



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**MODIFIKACE GRAFITICKÝCH LITIN A ODEZNÍVÁNÍ  
MODIFIKAČNÍHO ÚČINKU**

MODIFICATION OF GRAPHITIC CAST IRONS AND FADING OF THE MODIFICATION EFFECT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Daniel Paták**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**

**BRNO 2021**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Daniel Paták**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Václav Kaňa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Modifikace grafitických litin a odeznívání modifikačního účinku

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Objev modifikace grafitických litin a následné zavedení výroby litiny s kuličkovým grafitem vedlo k výraznému zvýšení podílu litinových odlitků v průmyslové praxi. Modifikace se nejčastěji provádí přidáním přesného množství hořčíku. Ovšem modifikační efekt není trvalý, ale v čase dochází k jeho snižování, tzv. odeznívání, kdy dochází k postupnému snižování mechanických vlastností litiny.

### Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést literární rešerši zabývající se způsoby modifikace grafitických litin s popisem vlastního principu modifikačního účinku a s důrazem na jeho odeznívání. V rámci práce bude proveden i experiment zkoumající odeznívání modifikačního účinku na reálném materiálu.

### Seznam doporučené literatury:

ROUČKA, J. Metalurgie litin. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.

ALAGARSAMY, A. Ductile iron handbook. Des Plaines, Ill.: American Foundrymen's Society, c1992. ISBN 08-743-3124-2.

ŠENBERGER, J. Metalurgie oceli na odlitky. V Brně: VUTUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

**ABSTRAKT**

PATÁK Daniel: Modifikace grafitických litin a odeznívání modifikačního účinku

Práce předkládá literární rešerši týkající se výroby litin s kuličkovým grafitem. Důraz je zde kladen na objasnění principu modifikace a odeznívání modifikačního účinku. V rámci práce byl proveden vlastní experiment zkoumající danou problematiku s popisem vlastní metody modifikace a vyhodnocením odeznívání modifikačního účinku.

Klíčová slova: litina s kuličkovým grafitem, modifikace, hořčík, odeznívání modifikačního účinku

**ABSTRACT**

PATÁK Daniel: Modification of graphitic cast irons and fading of the modification effect

The thesis presents a literature research concerning the production of cast irons with globular graphite. Emphasis is on the clarification of the modification principle and the fading of modification effect. Within the scope of the thesis, an in-house experiment investigating the issue has been carried out with a description of the modification method itself and an evaluation of the decay of the modification effect.

Keywords: cast iron with globular graphite, modification, magnesium, fading of modification effect

**BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PATÁK, Daniel. *Modifikace grafitických litin a odeznívání modifikačního účinku* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132388>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Václav Kaňa.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 21.5.2021

.....

Podpis

**PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu Ing. Václavu Kaňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu při psaní této práce a celého studia.

## Obsah

<b>Úvod .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Chemické složení litin a jejich druhy.....</b>	<b>10</b>
1.1 Hodnocení tvaru grafitu .....	12
1.2 Struktura a mechanismy růstu kuličkového grafitu .....	13
1.3 Litina s kuličkovým grafitem.....	14
<b>2 Modifikace grafitických litin .....</b>	<b>16</b>
2.1 Tavicí agregáty pro výrobu LKG.....	17
2.1.1 Kuplovný.....	17
2.1.2 Elektrické indukční pece.....	19
2.2 Možnosti modifikace LKG.....	21
2.2.1 Metoda SANDWICH.....	22
2.2.2 Metoda TUNDISH .....	22
2.2.3 Konvertorový způsob .....	23
2.2.4 Metoda ponorným zvonem .....	23
2.2.5 Modifikace ve sferoklávu .....	24
2.2.6 Kontinuální modifikace .....	24
2.2.7 Modifikace plněným profilem.....	25
2.3 Modifikátory.....	25
2.4 Očkování.....	26
<b>3 Odeznívání modifikačního účinku .....</b>	<b>27</b>
3.1 Fyzikální podstata úbytku hořčíku .....	27
3.2 Chemická podstata ztrát hořčíku .....	28
<b>4 Popis vlastního experimentu.....</b>	<b>30</b>
4.1 Vyhodnocení chemického složení vzorků .....	31
4.2 Vyhodnocení metalografických výbrusů vzorků .....	33
<b>5 Závěry.....</b>	<b>37</b>
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	



## Úvod

V České republice je dlouhá tradice výroby odlitků ze slitin železných kovů. Tato produkce průměrně činila přibližně 350 000 t/rok v minulém desetiletí. Polovinu této produkce tvořila litina s lupínkovým grafitem (dále LLG) a zbytek se skládal sestupně podle produkce z oceli, litiny s kuličkovým grafitem (dále LKG) a temperované litiny. [1]

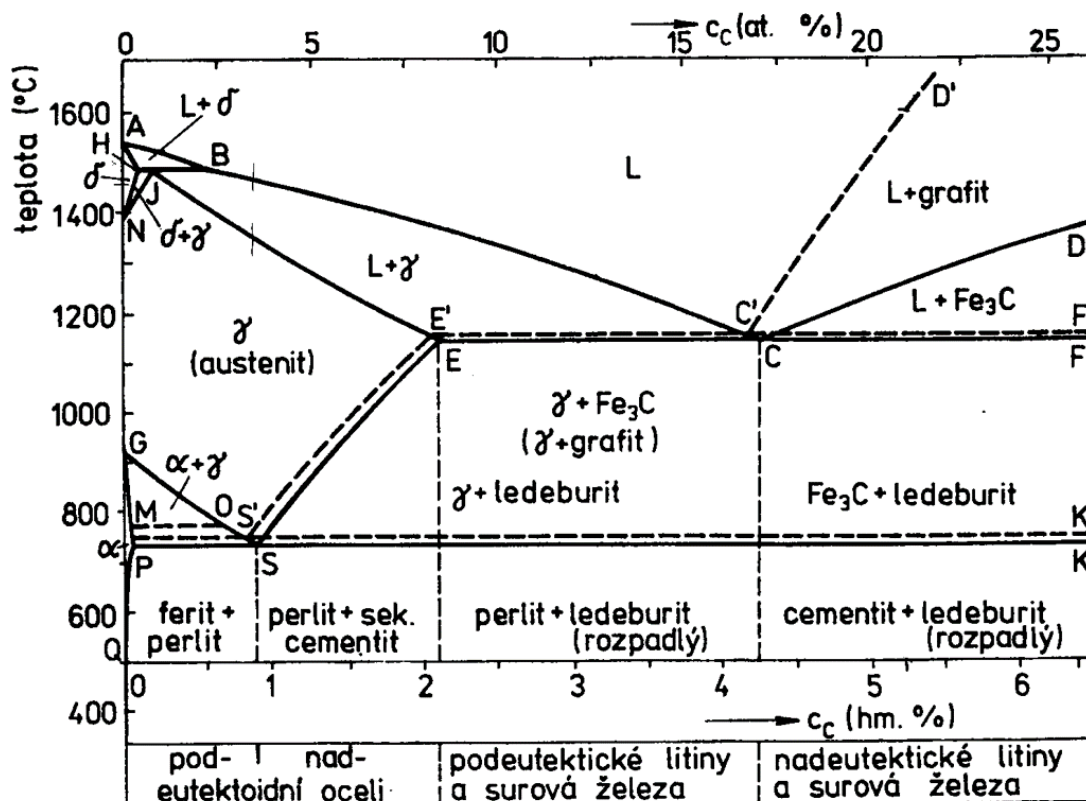
LKG má nižší měrnou hmotnost než ocel a je výhodnější na výrobu z důvodu nižší spotřeby energie ve výrobním procesu. Má lepší slévárenské vlastnosti (zabíhavost, stahování vlivem chladnutí) a lépe tlumí vibrace a chvění. Tyto výhody se samozřejmě promítají i v ceně. [4]

LKG se vyrábí podobným způsobem jako LLG, rozdíl je však v tom, že aby bylo dosaženo kuličkového grafitu je třeba taveninu modifikovat. Modifikace je bouřlivá reakce a provádí se těsně před odlitím z důvodu rychlého odeznívání jejího účinku. Při úbytku modifikátoru se začnou kuličky rozpadat do červíkovitého tvaru a litina začne přicházet o své mechanické vlastnosti.

Cílem práce je provést literární rešerši zabývající se způsoby modifikace grafitických litin s popisem vlastního principu modifikačního účinku a s důrazem na jeho odeznívání. V rámci práce bude proveden i experiment zkoumající odeznívání modifikačního účinku na reálném materiálu.

## 1 Chemické složení litin a jejich druhy

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších prvků. Na rozdíl od ocelí, litiny obsahují více než 2,14 % uhlíku. K predikci vyloučených fází a mikrostruktury materiálu, slouží rovnovážný diagram Fe – C (stabilní soustava) a Fe – Fe<sub>3</sub>C (metastabilní soustava) viz Obr.: 1.1.



Obr.: 1.1 Diagram (železo - uhlík) Fe – C - čárkovaný, (železo - karbid železa) Fe - Fe<sub>3</sub>C – plnou čarou [2]

Popis jednotlivých fází:

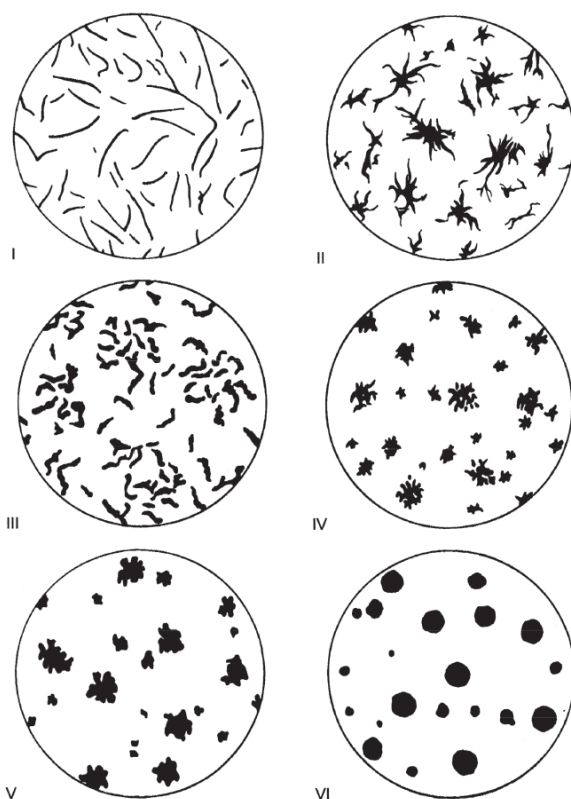
- **Austenit (Fe<sub>γ</sub>)** – tuhý roztok uhlíku v železe γ, vyskytující se nad teplotou A<sub>c3</sub>. Austenit krystalizuje v krychlové plošně středěné mřížce (FCC). To má za následek, že má vyšší rozpustnost uhlíku než ferit. Rozpustnost uhlíku v Fe<sub>γ</sub> je do 2,14 hm. % [2].
- **Ferit (Fe<sub>α</sub>)** – Vyskytuje se pod teplotou A<sub>c3</sub>. Vylučuje se v krychlové prostorově středěné mřížce. Rozpustnost uhlíku v Fe<sub>α</sub> je do 0,018 hm. % [2].
- **Grafit (C)** – Vyskytuje se ve stabilní soustavě. Krystalizuje v šesterečné mřížce. Je měkký, mazlavý, houževnatost a pevnost jsou nižší než u železa [2].
- **Cementit (Fe<sub>3</sub>C)** – Vyskytuje se v metastabilní soustavě. Krystalizuje v kosočtverečné mřížce. Je velmi tvrdý a křehký. Při vyšší teplotě se rozpadá na Fe a C, tohoto jevu se využívá při výrobě temperované litiny [2].
- **Ledeburit** – eutektická směs austenitu a cementitu vznikající u slitin s obsahem uhlíku nad 2,14 % (litiny) [2].
- **Perlit** – eutektoidní směs feritu a cementitu vznikající při rozpadu austenitu. U ocelí se vyskytuje hlavně v lamelární formě [2].

Struktura litin je tvořena primární fází a eutektikem. Při tuhnutí v stabilním systému se tvoří grafitické eutektikum, které je tvořeno austenitem a uhlíkem, který je vyloučen ve formě grafitu. Kvůli tomuto volně vyloučenému grafitu, se těmto materiálům říká grafitické litiny, protože v lomu jde vidět šedá až černá barva grafitu. Při tuhnutí v metastabilním systému se tvoří eutektikum ve formě ledeburitu a jelikož se zde nevyskytuje volný grafit, tak jsou tyto litiny v lomu světlé. Proto se těmto materiálům říká bílé litiny [3].

Litiny se rozdělují podle forem vyloučeného uhlíku na tyto druhy:

- **Litina s lupínkovým grafitem (LLG)** – Grafit je zde vyloučen ve formě prostorových útvarů, které mají tvar hlávkového salátu. Tyto obrazce mají na metalografických výbrusech tvar lupínků, které mají ostré zakončení. V těchto ostrých koncích dochází k iniciaci a šíření trhlin vlivem vrubového účinku [3], [5], [17].
- **Litina s kuličkovým grafitem (LKG)** – Také nazývána jako tvárná litina či GJS. Grafit je zde vyloučen ve formě kuliček. Je-li ve struktuře dosaženo dokonalých kuliček, nebude vznikat vrubový účinek a pozitivně tak budou ovlivněny mechanické vlastnosti [3], [5], [18].
- **Litina s červíkovitým grafitem (LVG)** – Také nazývána jako litina vermikulární. Grafit je zde vyloučen podobně jako u LLG. Rozdíl je v tom, že červíky jsou kratší, širší a mají kulatější konce. Z toho vyplývá, že mechanické vlastnosti jsou zde lepší než u LLG. LVG vzniká tak, že se provádí modifikace jako u LKG, ale rozdíl je zde obsah hořčíku, kterého je pro výrobu vermikulárního grafitu méně [3], [5].
- **Temperovaná litina (GJM)** – Grafit má zde vločkovitý tvar. Může být s černým i bílým lomem. Struktura je tvořena feritem a perlitem, u větších průřezů je struktura tvořena perlitem, feritem a temperovaným grafitem. Konečné mechanické vlastnosti se získávají tepelným zpracováním po odlití [3], [5], [16].

## 1.1 Hodnocení tvaru grafitu



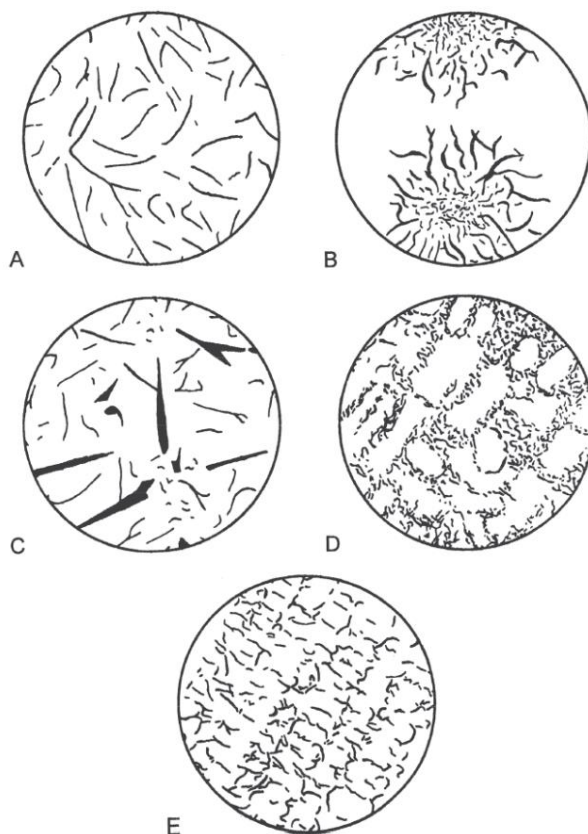
Tvar grafitu se klasifikuje podle normy ČSN EN ISO 945-1 [8] (viz obr.: 1.2). Grafit se hodnotí na vyleštěných vzorcích. Vzorky se pozorují mikroskopem, při 100násobném zvětšení. Z hlediska tvaru dělíme grafit na [8]:

- I – lupínkový
- II – pavoučkový
- III – červíkovitý
- IV – vločkový
- V – nedokonale kuličkový
- VI – pravidelně kuličkový

Z hlediska rozložení se rozděluje tato uspořádání na:

- A – rovnoměrné
- B – růžicovitě
- C – smíšené
- D – mezidendritické neusměrněné
- E – mezidendritické usměrněné

Obr.: 1.2 Tvar grafitu [8]



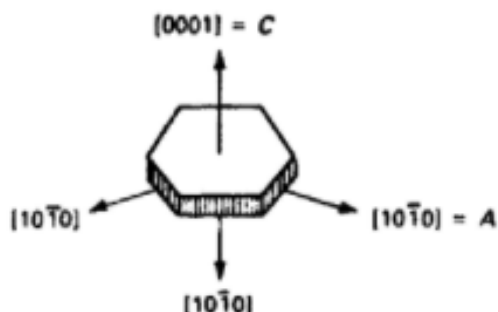
Uspořádání grafitu v litině má významný vliv na mechanické vlastnosti. Z hlediska vlastností litin je nejvýhodnější rozložení grafitu typu A. Rovnoměrně rozložená struktura o grafitových útvarech stejné velikosti je vhodná, jelikož je materiál stejně soudržný v celém průřezu a nevznikají v něm koncentráty napětí [3].

Jestliže je ale grafit rozmístěn nerovnoměrně (např. uspořádání B z obrázku 1.3), dochází v oblasti útvaru k úbytku kovové matrice, jenž lépe přenáší napětí, tudíž tyto útvary budou snáze iniciovat lom při zatížení materiálu [3].

Grafit v litině působí vrubovým účinkem. Čím ostřejší konce grafitových útvarů, tím více vrubový účinek roste. Proto jsou lupínky pro mechanické vlastnosti nepříznivé a kuličky jsou vhodnější [3].

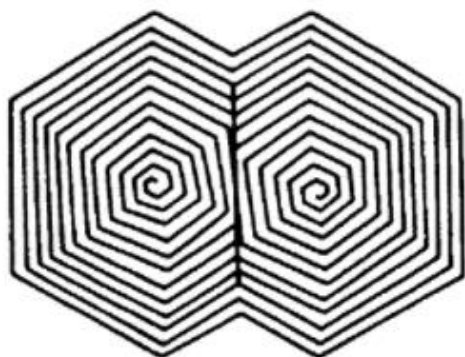
Obr.: 1.3 Rozložení grafitu [8]

## 1.2 Struktura a mechanismy růstu kuličkového grafitu



Grafit je krystalická forma uhlíku, krystalizující v hexagonální soustavě. Čelní plocha grafitu se nazývá bazální rovina. Směr růstu v bazální rovině se značí „C“  $[0001]$ . Obvodová plocha grafitu se nazývá prizmová rovina. Směr růstu v prizmové rovině se značí „A“  $[10\bar{1}0]$ . Směr růstu je znázorněn na Obr.:1.2. [9], [3], [23]

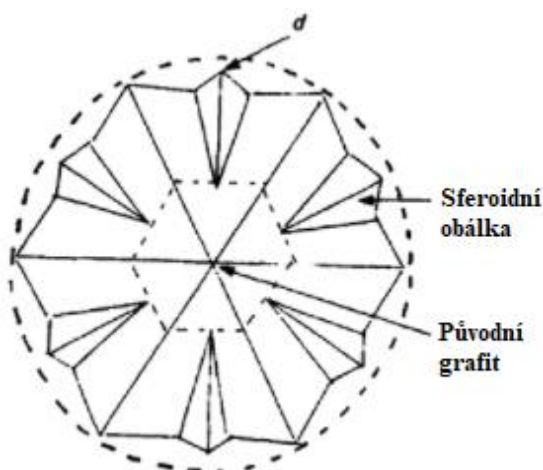
Obr.: 1.4 Růst grafitu v hexagonální soustavě [9]



Existuje několik teorií, které popisují růst kuličkového grafitu.

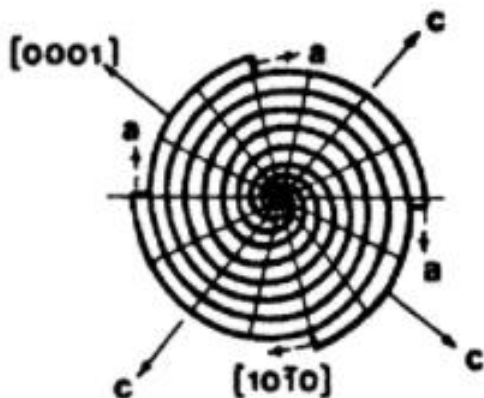
Model šroubovicových dislokací popisuje mechanismus, kdy se atomy ceru, či hořčíku naváží na atomy uhlíku, jež jsou na okrajích tuhnutí mřížky. Vytvořením dislokací na těchto okrajích dojde k růstu grafitu ve formě šroubovice. Po čase se spirály začnou protínat (viz Obr.:1.3) a začnou tvořit sférický tvar. [9], [23]

Obr.: 1.5 Růst kuliček grafitu šroubovicovými dislokacemi [9]



Dalším mechanismem je model rozpadu rozhraní. Ten popisuje stabilní růst krystalu grafitu, který se stane nestabilním po překročení kritických rozměrů. Na stěnách nestabilního krystalu se začnou tvořit výčnělky, které po dosažení vzdálenosti  $d$  zastaví svůj růst (viz Obr.:1.6). S růstem těchto výčnělků dochází k zakulacení tvaru grafitu. Růst jednotlivých výčnělků má charakter růstu šroubovice [9], [23].

Obr.: 1.6 Růst grafitu modelem rozpadu rozhraní [9]



Teorie obvodového růstu grafitu vysvětluje mechanismus růstu tak, že se tento proces děje za co nejnižšího povrchového napětí, kde dochází k vyrazení sil působících na růst krystalu grafitu ve směru A, čímž podporuje růst ve směru C. Tento mechanismus může způsobit, že grafit bude růst po spirále (viz Obr.: 1.7) [9], [23].

Obr.: 1.7 Obvodový růst grafitu [9]

Teorie růstu na nukleačních zárodcích tvrdí, že sloučeniny Mg (MgO, MgS, Mg<sub>2</sub>Si) mají kubickou mřížku a v tavenině vytváří vhodné zárodky pro tvorbu kuliček. Je tedy nežádoucí, aby se v tavenině tvořily zárodky s hexagonální mřížkou (SiO<sub>2</sub>, FeS, SiC), které způsobují růst lupínkového grafitu [22], [9], [23].

Teorie povrchového napětí vysvětluje proces tak, že se modifikací mění fyzikálně-chemické vlastnosti taveniny. Desoxidací a desulfurizací se zvýší povrchové napětí, a protože kuličky mají nižší povrch než lupínkové útvary, snáze se vylučují. Je-li povrchové napětí  $\sigma > 1,3 \text{ N/m}$  vzniká globulární grafit. Nižší povrchové napětí způsobí vyloučení lupínkového grafitu. Čím je  $\sigma$  nižší, tím je grafit hrubší [22], [9], [23].

Teorie růstu v bublinách plynu jsou založeny na tvrzení, že je pro růst kuliček nutné, aby v tavenině byly volné prostory, kde by mohl grafit růst. Podle této teorie grafit nukleuje na povrchu bublin CO a jeho růst probíhá uvnitř bubliny. Zhroutí-li se bublina během růstu grafitu, vzniká kuličkový útvar, nehroutlí-li se bublina během krystalizace, dochází k tvorbě kuličkového grafitu. Tato teorie však obecně není přijímána [9], [23].

Teorie růstu skrze austenitickou obálku tvrdí, že se kolem nukleačního zárodku grafitu vytvoří austenitický obal, skrze který dochází k difuzi uhlíku z taveniny do grafitu, což způsobuje další růst grafitu [9], [23].

### 1.3 Litina s kuličkovým grafitem

Tab. 1 Doporučené chemické složení pro litiny s kuličkovým grafitem [5].

	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg	% Cu
min.	3,5	2,0	0,08	-	0,010	0,020	0,02
max.	3,8	2,5	0,65	0,035	0,020	0,065	0,80

LKG mají přibližně eutektické složení, případně nadeutektické ( $C_E \approx 4,2 - 4,7$ ). Vhodné chemické složení je uvedeno v Tab.1. U litiny s kuličkovým grafitem je kriticky důležitý obsah hořčíku, který má vliv na to, jak se vylučuje grafit. Při obsahu 0,02 hm. % Mg je riziko, že se již nevyloučí grafit ve formě kuliček. V praxi se tak dbá na to, aby Mg<sub>zbyt</sub> byl okolo 0,3 hm. %. Dalším podstatným prvkem je křemík, který podporuje grafitizaci taveniny a zajišťuje, že se grafit bude vylučovat podle stabilní soustavy. Nedostatek křemíku v litině by měl za následek tvorbu karbidů (zákalů). Měď je perlitotvorný prvek, jenž zvyšuje pevnost litiny. Fosfor má negativní vliv na obrobitelnost materiálu. Síra má negativní vliv na slévárenské vlastnosti a má vysokou afinitu k manganu, vytváří MnS. Tímto se kompenzují negativní vlivy síry [5].

Pevnost a tvrdost je závislá na chemickém složení litiny, které je reprezentováno uhlíkovým ekvivalentem či stupněm eutektičnosti. Stupeň eutektičnosti slouží k porovnání skutečného obsahu uhlíku s obsahem uhlíku, jenž odpovídá eutektické koncentraci při daném obsahu křemíku a fosforu. Stupeň eutektičnosti se dá vypočítat podle [3], [5], [7]:

$$S_c = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{4,26 - 0,31 \cdot Si - 0,33 \cdot P + 0,027 \cdot Mn - 0,4 \cdot S} \quad (1.1)$$

kde:  $S_c$  – stupeň eutektičnosti [%]

$C_c$  – koncentrace uhlíku v eutektiku [%]

Tento tvar se dá zjednodušit na:

$$S_c = \frac{C}{4,26 - 0,3 \cdot (Si + P)} \quad (1.2)$$

$S_c > 1$  – nadeutektická litina

$S_c = 1$  – eutektická litina

$S_c < 1$  – podeutektická litina

Uhlíkový ekvivalent ( $C_E$ ) koresponduje s ( $S_c$ ) a slouží k určení polohy dané slitiny v diagramu Fe-C.

$$C_E = C + \sum_{i=1}^n (m_i \cdot x_i) \quad (1.3)$$

kde:  $C_E$  – uhlíkový ekvivalent

$m_i$  – koeficient vlivu prvku x

$x_i$  – obsah prvku x [%]

Kvůli obvyklému množství určitých prvků a velikosti koeficientu  $m_i$ , se tento tvar dá vyjádřit touto formou:

$$C_E = C + 0,3 \cdot (Si + P) \quad (1.4)$$

$C_E > 4,25$  – nadeutektická litina

$C_E = 4,25$  – eutektická litina

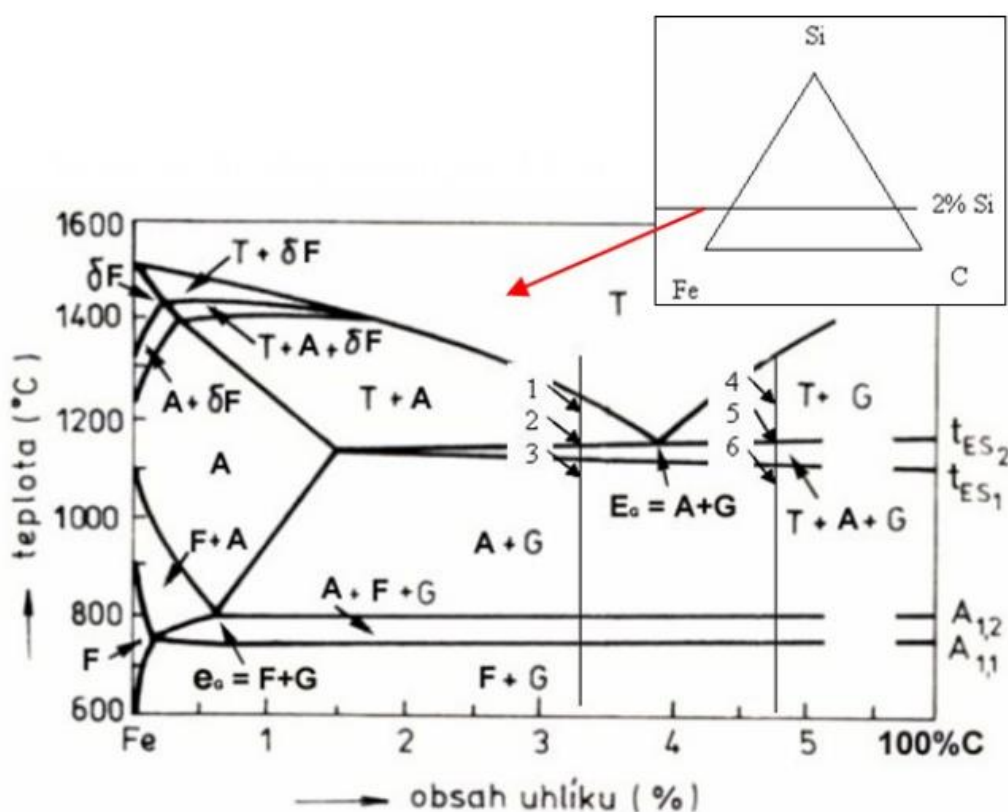
$C_E < 4,25$  – podeutektická litina



## 2 Modifikace grafitických litin

Modifikací se mění tvar grafitu při jeho krystalizaci, bez modifikace by se grafit vyloučil ve formě lupínků. Momentálně se používají modifikátory na bázi hořčíku, ale je možno použít i kovy vzácných zemin. Působením modifikátoru se lupínky mění na kuličky. Tímto se mění vlastnosti mechanické (mez pevnosti, houževnatost), fyzikální (tepelná roztažnost a vodivost) i technologické (korozivzdornost, svařitelnost, obrobiteľnost). Deglobulizačními prvky (zabraňují vylučování grafitu ve formě kuliček) jsou hliník, titan, cín, olovo, bismut a zinek. Teorie, podle kterých se vylučuje grafit ve formě kuliček, jsou popsány v kapitole 1.1 [6], [3], [5].

Při modifikaci dochází k postupnému rozpouštění par hořčíku, které probublávají sloupcem modifikované litiny, proto se lící pánve vyrábí co nejvyšší a nejvyšší. Tímto se docílí dlouhé dráhy bublin hořčíku na hladinu, které na sebe cestou vážou kyslík (dezoxidace), síru (odsíření) a další plyny vyskytující se v tavenině, tedy nastává rafinace taveniny a změna jejích fyzikálních vlastností. Jelikož je v LKG vysoký obsah uhlíku i křemíku, tak krystalizace probíhá podle pseudobinárního diagramu Fe-C-Si, viz obr. 2.1 [9].



Obr.: 2.1 Pseudobinární diagram Fe-C-Si [6]

Krystalizace LKG probíhá při podchlazení, při vytvoření zárodku grafitu probíhá radiálně symetrický růst grafitu v tavenině. Jakmile se kolem kuličky grafitu vytvoří austenitický obal, dochází k dalšímu růstu už jen přes mechanismus difuze (teplem aktivovaný děj, při kterém dojde k samovolnému přemísťování difundujícího prvku [21]) [5].



Podmínkou úspěšné modifikace litiny je dostatečně vysoká teplota procesu (cca 1450 °C). Modifikováním se snižuje teplota z toho důvodu, že se musí roztavit a vypařit hořčík. V praxi bylo vyzkoušeno, že tato tepelná ztráta činí od 40 až 70 °C. Další podmínkou je minimální množství hořčíku rozpuštěného v tavenině (cca 0,025 %). Rozpustnost hořčíku v tavenině je závislá na chemickém složení, teplotě a tlaku. U nelegovaných LKG se rozpustnost hořčíku při 1450 °C a atmosférickém tlaku uvádí 0,085 %. Může se stát, že i když v litině budou více jak 0,03 % Mg, struktura nebude kuličkovitá. Je to způsobeno tím, že ve vsázce bylo příliš síry, která na sebe navázala značnou část hořčíku. S tímto je nutno počítat při výpočtu vsázky. Doporučuje se udržovat obsah síry v litině před modifikací mezi 0,01 – 0,02 %. Zbytkový hořčík se doporučuje udržovat v rozmezí 0,030 – 0,055 % [5].

## 2.1 Tavicí agregáty pro výrobu LKG

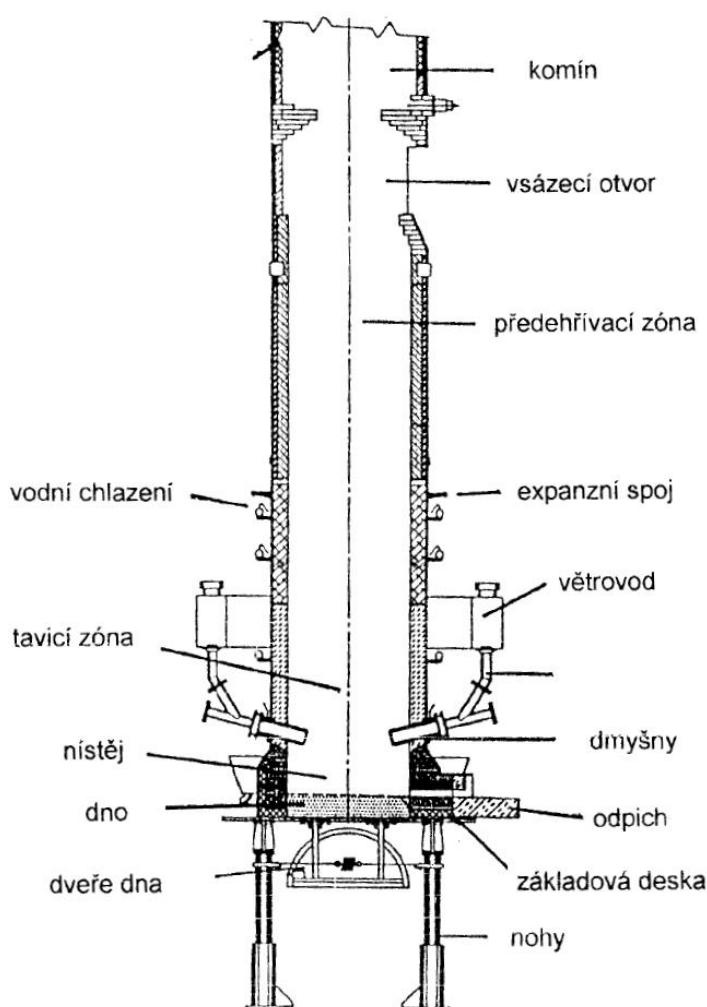
Zařízení pro výrobu litin musí splňovat určité požadavky, kterými jsou [9], [3]:

- co nejnížší obsah síry (maximálně 0,02 % S) v tavenině. Čím méně bude síry v tavenině, tím méně se vyplývá hořčíku v procesu
- udržení obsahu křemíku v rozmezí 2,0 – 2,5 %, v případech, kdy se používá modifikace předslitinami Fe-Si-Mg může být tento obsah 1,0 – 1,5 % [9]
- vysoký obsah uhlíku, obvykle v rozmezí 3,60 – 4,00 %
- vysoká teplota při odpichu, uvádí se 1454 – 1566 °C. Záleží na velikosti odlitků a metodě modifikace
- nízký obsah zbytkových prvků, např. chrom, měď, molybden, vanad atd.
- stabilita procesu tavení a možnost kontroly chemického složení a teploty

Vhodnými agregáty jsou kuplovny a elektrické indukční pece. Elektrické obloukové a bubnové pece jsou používány spíše výjimečně. Proto v této práci budou popsány jen první dva agregáty.

### 2.1.1 Kuplovny

Kuplovna, neboli kupolní pec, je šachtovité zařízení pro tavbu železných slitin. Zařízení bývá po celé výšce vyzděno žáruvzdornou vyzdívkou a obaleno ocelovým pláštěm s vodním chlazením, které může snížit namáhání vyzdívky a prodloužit jeho životnost. Kuplovna je tvořena komínem, šachtou a nístějí a může být 4,5 až 7,5 metrů vysoká (viz. Obr.: 2.2). Komín tvoří prostor nad vsázecím otvorem a slouží k odvodu spalin. Komín bývá vybaven filtry pevných částic, kvůli snížení uhlíkových emisí. Šachta je prostor mezi dmyšny a vsázecím otvorem. V šachtě dochází k postupnému ohřevu materiálu, kde v horní části dochází k přehřevu a ve spodní části k tavení. Dmyšny slouží k dopravení vzduchu do kuplovny. Dmyšny bývají měděné součásti chlazené vodou se schopností regulovat množství dmýchaného vzduchu. Obvykle bývá 4 – 6 dmyšen po obvodu kuplovny. Okružní větrovod je potrubí vinoucí se kolem pece, přivádějící vzduch k jednotlivým dmyšnám. Nístěj je část pod šachtou, v které se nachází roztavený kov. Z nístěje se provádí odpich, zapálení koksu při začátku tavby a slouží obsluze k opravám a údržbě. Dno je konstrukčně nejvíce namáhaný prvek, jelikož na něm leží celá vsázka. Během tavby musí být řádně zajištěno a uzavřeno [10], [15].



Kuplovny mohou být konstrukčně upraveny podle způsobu odpichu. Odpich může být buď kontinuální, či periodický.

Pro periodický odpich se používá vyšší nístěj (pro kumulaci taveniny), která se po odpichu uzavírá jílo-grafitovou zátkou, tu je nutno při dalším odpichu rozbít. Struska se vypouští po odpichu struskovým otvorem, který je umístěn nad otvorem odpichovým. Dno se používá dvoudílné vyklápěcí. U této metody je nutno mít kuplovnu postavenou na nohách, aby měl kam padat zbytkový koks, popel a kov po otevření dveří dna. Při periodickém odpichu dochází k většímu nasíření taveniny, kvůli delší době styku s koksem [10], [15].

Obr.: 2.2 Schéma kuplovny [3]

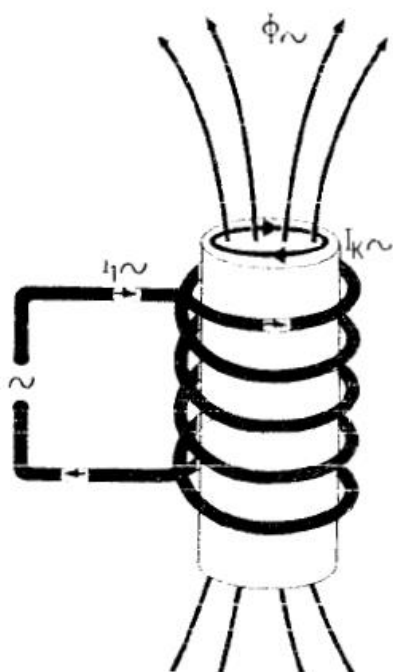
Pro kontinuální odpich se již nepoužívá nístěj pro nahromadění kovu, tudíž se používají nižší nístěje. Kov se struskou kontinuálně odtékají skrze odpichový otvor a jsou od sebe separováni v sifonu. Sifon funguje na principu spojených nádob, struska je lehčí než kov, tudíž plave na hladině a kov protéká pod přepážkou. Ve stěně nístěje jsou umístěna pracovní dvířka pro obsluhu, jenž slouží pro údržbu a opravy vyzdívky, když je kuplovna mimo provoz. Dno se používá celistvé [10], [15].

Největší obsah tavby činí kovová vsázka, ta se obvykle skládá ze surového železa, ocelového odpadu a litinového odpadu. Sérioví výrobci LKG mohou použít vsázku tvořenou z 80 – 90 % ocelového šrotu, zatímco slévárny, jenž taví litinu s kuličkovým grafitem, příležitostně používají ocelový šrot z 15 – 20 %. Surového železa může být 0 – 40 %, v závislosti na požadovaném obsahu uhlíku. Tento materiál slouží ke kontrole chemického složení, hlavně obsahu uhlíku v procesu. Použití vratné LKG je limitováno obsahem křemíku. Obsah vratné LKG se uvádí v rozmezí 40 – 60 % pro nesespecializované slévárny [9].

U kuploven je problém s topením koksem, protože koks má vysoký obsah síry, tudíž dochází k nasíření taveniny (obsah S se uvádí v rozmezí 0,07 – 0,12 %). To je při výrobě LKG kontraproduktivní, jelikož má hořčík vysokou afinitu k síře, čímž se urychluje odeznívání modifikačního účinku. Proto je vhodné, aby byla tavenina ještě před vlastní modifikací odsířena. Pro desulfurizaci se používá karbid vápníku  $\text{CaC}_2$ , oxid vápenatý  $\text{CaO}$ , uhličitan sodný  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , či hydroxid sodný  $\text{NaOH}$  [3], [9], [10], [15].

### 2.1.2 Elektrické indukční pece

Vedle kuploven jsou elektrické indukční pece (dále EIP) nejpoužívanějším tavícím agregátem pro výrobu LKG. Tyto pece jsou obecně ekonomicky i ekologicky přívětivější pro provoz než kuplovný z důvodu, že zde nevznikají emise prachových částic, které by bylo nutno filtrovat. EIP poskytují možnost rychlého a efektivního tavení, s možností přesného regulování teploty a chemického složení procesu. Nedochází zde k ovlivnění chemie tavby z důvodu ohřevu, jako je tomu u kuploven [3], [9], [10], [14].



Indukční ohřev je proces, při kterém dochází k ohřevu elektricky vodivého materiálu, ve kterém se indukuje elektrické napětí, za působení magnetického pole. Magnetické pole vzniká v indukční cívce (viz Obr.:2.3), při průchodu střídavého proudu. Indukované napětí v materiálu vyvolá vířivé proudy, který materiál ohřívají a míchají. Tento proces popisuje Jouleovo teplo [3], [12], [13].

$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (2.1)$$

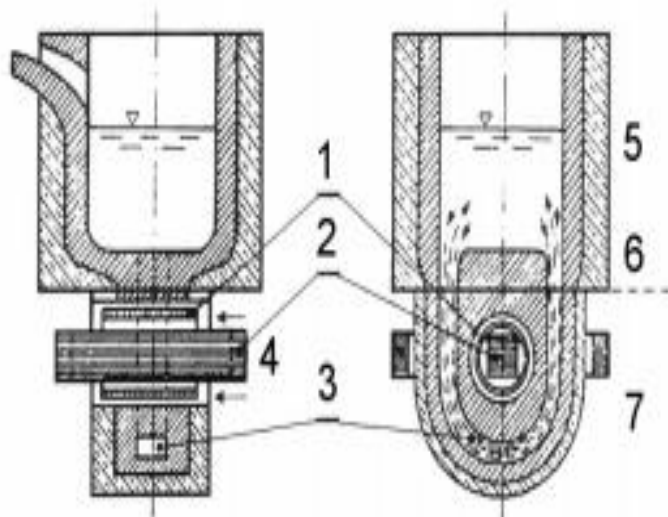
kde:  $Q$  – Jouleovo teplo [J]  
 $R$  – odpor materiálu [ $\Omega$ ]  
 $I$  – proud [A]  
 $t$  – doba vystavení proudu [s]

Obr.: 2.3 Cívka [3]

Při ohřevu v EIP nedochází k rovnoměrnému ohřevu materiálu v průřezu. Na okrajích vsázky je proudová intenzita vyšší a v ose nižší. Tento jev má vyšší vliv, při zvýšení frekvence. Tloušťka vrstvy, v níž se indukuje většina výkonu, se nazývá hloubka vniku [3], [10], [11].

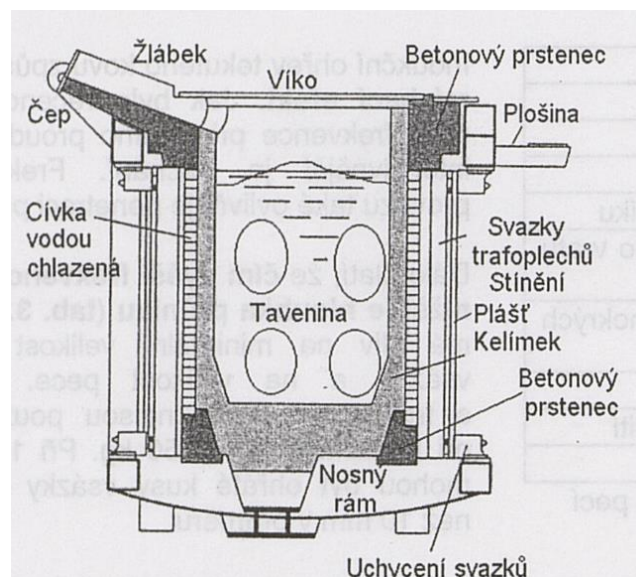
Elektrické indukční pece se dělí podle umístění induktoru na:

- kanálkové – Tavicí cívka tvoří samostatnou část (viz Obr.:2.4). Okolo cívky je tavící kanál, kudy proudí tekutý kov, který se v průběhu kanálem ohřívá a míchá se se zbytkem taveniny, čímž ji ohřívá. Kov musí po odlití zůstat v kanálku, aby bylo možné roztavit další vsázku. Kvůli tomu se kanálkové pece používají celý den bez zastavení. Z důvodu obtížnosti roztavení materiálu, jsou vhodnější pro tavení kovů s nižší teplotou tání. Pro výrobu LKG se používají jako udržovací pece, kam se může lít litina z kuploven [10], [3], [14].



Obr.: 2.4 Kanálková indukční pec [14]

- kelímkové – Tavicí cívka objímá celý kelímek. Žárovzdorná vyzdívka kelímku je tenká a má tvar jednoduchého válce (viz obr.:2.5), proto jsou konstrukčně jednodušší a celý jejich obsah může být vylit. Kelímkové pece obvykle pracují na frekvenci od 250 Hz do 3000 Hz. Vysoká hustota výkonu umožňuje rychlé tavení bez nadměrného míchání. Tyto pece jsou vhodnější pro tavbu LKG než pece kanálkové [10], [3], [14].



Obr.: 2.5 Kelímková indukční pec [15]

Vsázka pro tavení v EIP by měla být kusovitá a měla by mít velikost nanejvýše 1/3 průměru kelímku, jinak je zde riziko vzpříčení jednotlivých kusů. Indukční pece mají obecně problém s přenosem vířivých proudů ve studených kusovitých blocích. Při neroztavení vsázky může dojít k její sintraci, což může způsobit problémy s potápěním vsázky po natavení materiálu.

Vstupní suroviny pro tavbu mohou být např. surové železo, vratná litina, ocelový odpad, či paketoované plechy a třísky. Je vhodné, aby vsázka neobsahovala vlhkost a mastnotu [3], [10].

## 2.2 Možnosti modifikace LKG

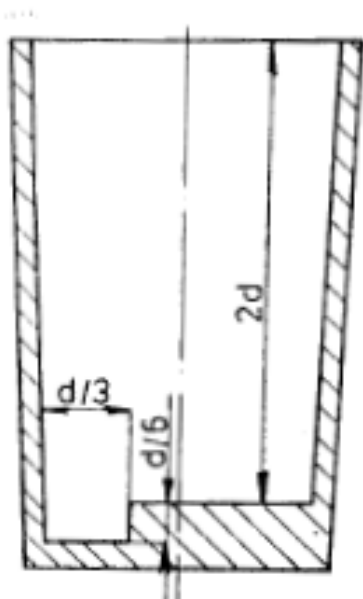
Volba modifikační metody závisí na spoustě faktorů, nedůležitějšími kritérii však bývají [9]:

- **Základní materiál** – Typ tavícího agregátu a vsázkové suroviny hrají důležitou roli z hlediska chemie a mohou mít zásadní vliv na obsah křemíku a síry v tavenině.
- **Druh odlitku** – Tenké stěny odlitků vyžadují vyšší teploty lití, aby nedošlo k předčasnému zatuhnutí kovu. Je tedy vhodné uvažovat nad nejrychlejšími metodami, při odlévání tenkostěnných odlitků.
- **Velikost tavby** – V potaz by měl být brán limitovaný obsah jednotlivých modifikačních zařízení, z důvodu nutnosti udržování kovu v tekutém stavu.
- **Jednoduchost** – Měly by být brány v potaz zkušenosti personálu s celým procesem. Špatná organizace modifikace může mít za následek odeznění modifikačního účinku ještě před vlastním litím.
- **Mechanizace** – Je nutné zvážit automatizovatelnost procesu, čímž se dá zefektivnit vlastní výrobu a zamezit chybovosti výroby.
- **Reprodukovatelnost** – Schopnost zachovat jakost jednotlivých šarží je pro sériovou výrobu nepostradatelná. Je tedy nutné zvážit, které metody vyhovují dané sériovosti.
- **Rozměrové limitace** – Rozložení slévárny může též limitovat metody, které mají určitou rozměrovou náročnost.
- **Metoda očkování** – Metoda očkování by měla být též brána v potaz, při špatné kombinaci modifikace a očkování může dojít k tvorbě cementitu či nevhodné disperzité grafitu.
- **Cena** – Cena hraje nejdůležitější roli v celém výrobním procesu. Je nutno zvolit metodu, která je finančně nejméně náročná, a přitom má nejvyšší efektivitu výroby.

Modifikace se provádí různými způsoby. Nejjednodušším způsobem dělení metod je rozdělení na:

- **Polévací** – modifikátor je vložen na dno pánve a je poléván roztaveným kovem. Po ukončení modifikační reakce se tavenina přelege do transportní pánve či do lící pánve a následuje lití. Nejznámějšími zástupci polévacích metod jsou metoda SANDWICH, TUNDISH a jejich alternace. Tyto metody jsou jednodušší na provedení, jsou finančně méně náročné, a to je důvodem, proč se používají ve slévárnách, které se více zaměřují na odlévání jiných materiálů. Tyto metody jsou nevhodné z hlediska využití modifikátoru [3], [7].
- **Ponořovací** – funguje na principu vnořování modifikátoru do taveniny. Tyto metody mohou probíhat za zvýšeného tlaku okolní atmosféry, tím snižují vypařování hořčíku. Typickými zástupci této metody je modifikování plněným profilem, v tlakové pánvi, nebo ve sferoklávu. Tyto metody jsou finančně náročnější, avšak zaručují vyšší kvalitu a prodlužují čas na manipulaci s taveninou [3], [7].

### 2.2.1 Metoda SANDWICH

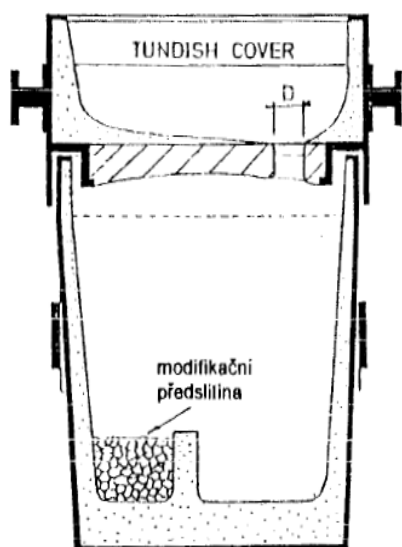


Jedná se o modifikaci v otevřené pánvi (viz Obr.:2.6), která mívá ve svém dně vytvořenou kapsu. Do této kapsy se vkládá modifikátor, který se obvykle zasype plechy, aby po nalití roztaveného kovu modifikátor nezačal plavat. Tímto se zajistí klidnější průběh modifikace a díky tomu se prodlouží čas na manipulaci s tavnou, než modifikační účinek odezní. Proces zde spočívá v tom, že se taveninou zaplní pánev, tím se zvýší metalostatický tlak, který zklidní průběh procesu. Čím vyšší tlak, tím bude vypařování probíhat déle. Metalostatický tlak se dá zvýšit pomocí výšky hladiny. Tento jev je jedním z důvodů, proč se lící pánve vyrábí úzké a vysoké, obvykle v poměru H:D 3:1. Krycí plechy obvykle tvoří 2 % celkové hmotnosti tavby [3], [7], [5], [20].

Obr.: 2.6 Pánev na modifikaci metodou SANDWICH [3]

Protože je pánev otevřená, může při modifikaci docházet k rozstříku kovu z důvodu bouřlivosti procesu modifikace. Jelikož tavenina dosahuje teploty okolo 1400 °C, musí se dbát na bezpečnost práce. Využití hořčíku se uvádí, že je 40 – 50 % dle literatury [3]. Literatura [7] uvádí, že využití Mg je 10 – 30 %. Jestliže pánev nemá kapsu ve svém dně, ztráty hořčíku se mohou navýšit [3], [7], [5], [20].

### 2.2.2 Metoda TUNDISH



Jedná se o zdokonalenou verzi metody SANDWICH. Pánev je vybavena víkem s nalévacím otvorem. Na víku je lící jamka, která je tak velká, aby udržela při nalévání stabilní hladinu kovu (viz Obr.2.7). Díra ve víku má být umístěna tak, aby tavenina netekla na modifikátor. Je zde nutnost, aby víko bylo řádně zajištěno, kvůli unikajícím plynům, které mají snahu zvedat poklop [3], [7], [5], [20].

Obr.: 2.7 Pánev na modifikaci metodou TUNDISH [3]

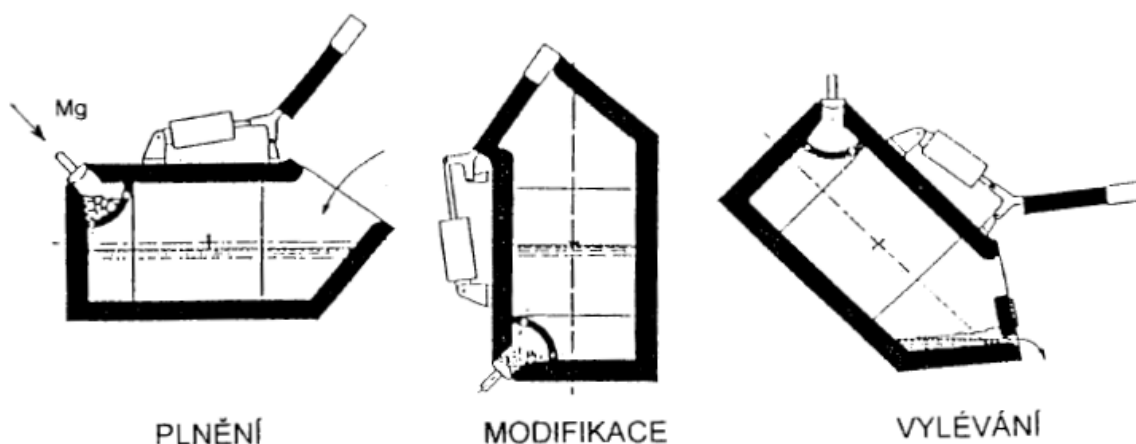
Na dně pánve je příčka, která tvoří kapsu pro modifikátor a kapsu pro taveninu. To způsobuje, že modifikační proces započne až v moment, kdy tavenina přeteče příčku. Hořčík se tedy začne odpařovat později. Jakmile tavenina přeteče příčku, modifikátor začne plavat. To je nežádoucí z důvodu, že bubliny hořčíku neprobublávají taveninou a urychlí se odeznívání. Tento jev je však negován tím, že je zde omezené množství vzduchu, takže se zde kyslík méně váže na hořčík a tím je zpomalen odeznívání [3], [7], [20].

Protože je pánev uzavřená, nedochází k rozstříku kovu při modifikování. Využití hořčíku se uvádí na 60 - 70 % dle literatury [3]. Literatura [7] uvádí, že využití Mg je 35 – 55 %. Díky uzavření pánve, zde dochází k nižším tepelným ztrátám a plyným exhalacím [5], [3], [7].

### 2.2.3 Konvertorový způsob

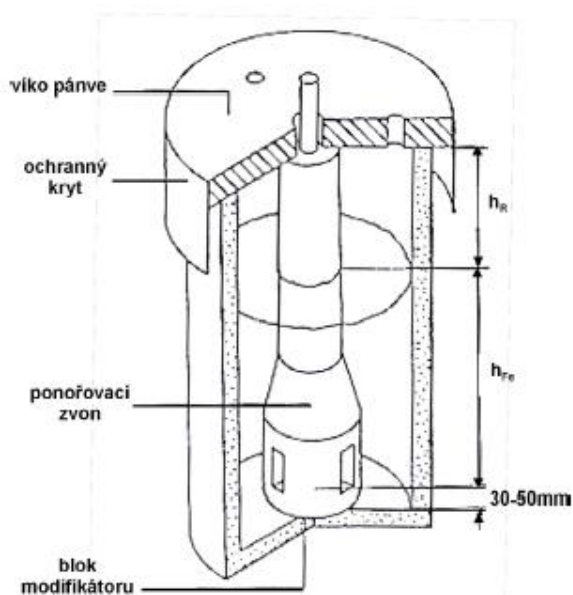
Další polévací metodou je modifikace v nádobě konvertoru, jenž je sklopná podél příčné osy. Nádoba má na horní straně nalévací otvor. Na rohu stěny a dna nádoby je modifikační komůrka, tvořena grafitovou deskou, ve které jsou díry, spojující komůrku s prostorem nádoby. Komůrka zamezuje volnému vyplouvání modifikátoru na hladinu taveniny.

Plnění tekutým kovem probíhá ve vodorovné poloze. Modifikátor je vložen do komůrky. V konvertoru je možnost modifikovat čistým hořčíkem. Modifikace probíhá po otočení pánve do svislé polohy. Tekutý kov vtéká do komůrky skrze díry a postupně taví modifikátor. Reakce trvá přibližně minutu a půl. Pánev se uzavírá, z důvodu zamezení oxidace. Při odlévání se konvertor otáčí otvorem dolů. Tyto polohy jsou znázorněny na Obr.2.8 [5], [3], [7].



Obr.: 2.8 Schéma procesu tavení v konvertoru [7]

### 2.2.4 Metoda ponorným zvonek

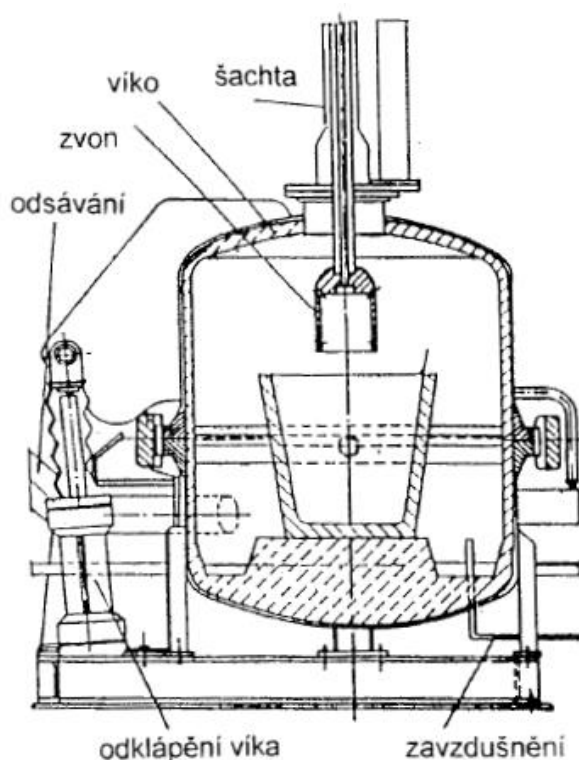


Obr.: 2.9 Zařízení pro modifikaci ponorným zvonek [7]

Tento způsob je nejstarší ponornou metodou. Zařízení se skládá z pánve a víka (viz Obr. 2.9). Víkem prochází grafitová tyč, na jejímž konci je ponořovací zvon, do kterého se umísťuje modifikátor. Zvony se vyrábí ze žáruvzdorných materiálů, jako jsou grafit a keramika. Jelikož je modifikátor ve zvonu, který je uložen u dna pánve (50 mm od dna), nedochází k vyplouvání modifikátoru na hladinu taveniny. Protože je pánev přikryta víkem, účinnost modifikace roste. [3], [7], [5].

Mezi hladinou kovu a víkem je atmosférický tlak, avšak víko do tohoto prostoru nepouští okolní vzduch. Díky tomuto jevu se využití hořčíku dostává přes 50 % [3], [7], [5].

### 2.2.5 Modifikace ve sferoklávu

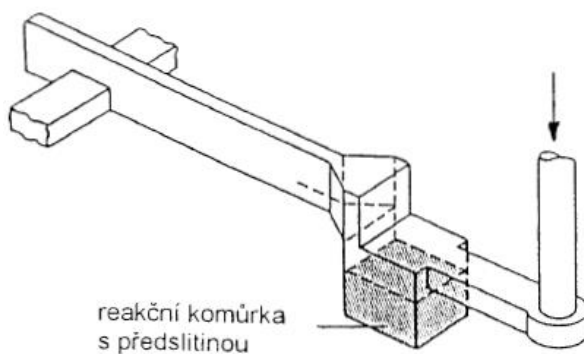


Metoda vylepšuje princip ponorného zvonu o vytvoření přetlaku. Pánev s kovem se zavazuje do nádoby sferoklávu, která je vybavena odklopným víkem, jímž prochází grafitová tyč, opatřená ponorným zvonem na konci. Náčrt zařízení je vyobrazen na obrázku 2.10. Po uzavření víka se tlak atmosféry v nádobě zvýší na 0,4 - 1 MPa a zvon s modifikátorem se umísťuje ke dnu pánve. Čím vyšší je teplota taveniny, tím vyšší je potřebný tlak atmosféry. Možnost regulace tlaku nad hladinou umožňuje snížit spotřebu hořčíku. Tato metoda umožňuje použití modifikátorů s vysokým obsahem Mg, dokonce i čistý hořčík. Využití Mg se uvádí, že se pohybuje v rozmezí 60 – 80 %. Tato metoda je vysoce efektivní, avšak nákladná [3], [7], [5].

Obr.: 2.10 Schéma sferoklávu [3]

### 2.2.6 Kontinuální modifikace

Modifikace probíhá při odlévání tekutého kovu z tavicího agregátu přímo do lící formy. Modifikátor může být umístěn v komůrce ve vtokové soustavě (metoda Inmold viz Obr. 2.11),



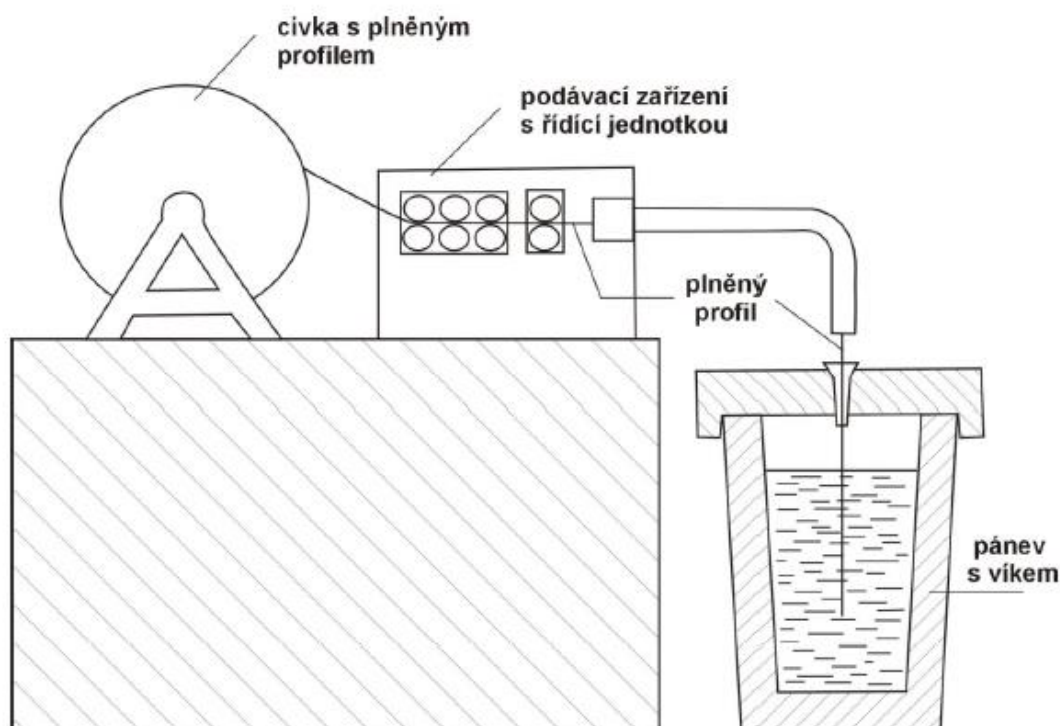
nebo mimo formu (metoda Flotret). Tato metoda má tu výhodu, že modifikace probíhá během odlévání odlitku (nehrozí zde odeznění modifikačního účinku). Navíc je to velice levná záležitost, avšak je zde požadavek na to, aby tavenina byla řádně odsířena (pod 0,01 % S), neboť u této metody není odsiřování při modifikaci možné. Zároveň se tím zamezuje tvorba sekundární strusky. Využití Mg se uvádí mezi 60 – 80 % [5], [3], [7].

Obr.: 2.11 Vtoková soustava pro metodu Inmold [3]



### 2.2.7 Modifikace plněným profilem

Princip metody je ten, že se plněný profil injektuje do roztavené litiny takovou rychlostí, aby se profil odtavoval co nejblíže ke dnu pánve. Tento způsob je vcelku jednoduchý. Vyžaduje podávací zařízení, které zajišťuje podávání profilu do taveniny a slouží k regulaci podávací rychlosti. Profil se podává skrze víko nasazené na pánvi (schéma na Obr. 2.12). Využití Mg se pohybuje v rozmezí od 35 do 70 %. Plněný profil je dutý drát, o tloušťce stěn 0,2 – 0,5 mm plněný modifikátorem. Profily se vyrábějí v průměrech 3, 5, 8, 12 a 18 mm [6], [3].



Obr.: 2.12 Schéma modifikace plněným profilem [6]

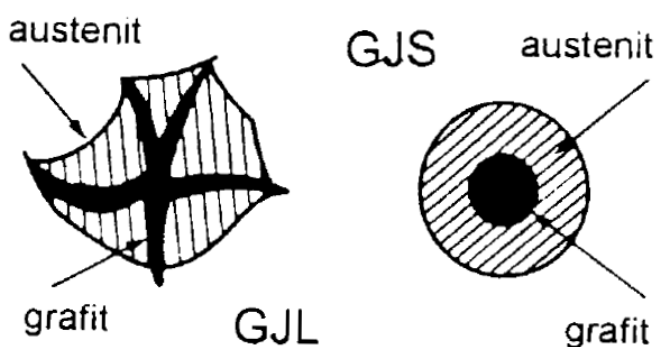
## 2.3 Modifikátory

K modifikaci je možno použít kovového hořčíku, nebo jeho předslitin. Kovový hořčík je vhodné používat u metod, kde je možné regulovat tlak, či omezit přístup kyslíku a tím zamezit bouřlivosti reakce. Tyto podmínky splňují modifikace ve sferoklávu a v konvertoru. Významné předslitiny jsou na bázi Fe-Si s obsahem Mg 5 – 25 %, modifikátory s nízkým obsahem Mg je vhodné používat u jednodušších metod (polévací), zatímco modifikátory s vyšším obsahem je vhodné používat u metod s řízenou modifikací (ponořovací metody a plněný profil). Legované litiny je vhodné modifikovat předslitinami na bázi NiMg, tyto přísady mají vyšší využití hořčíku, jelikož mají vysokou hustotu, mají tendenci se potápět a klidněji se rozpouštět, čímž snižují modifikační odeznívání [5].

## 2.4 Očkování

Výroba LKG se liší od výroby LLG vstupní vsázkou, mimo modifikačního procesu. U LKG se liší chemické složení tím, že potřebují více uhlíku a křemíku. Tyto prvky mají silný grafitizační účinek. Ten je potřeba, protože modifikace je rafinační proces, který má za následek snižování grafitizační schopnosti. To zapříčiňuje sklon k metastabilnímu tuhnutí, tedy k tvorbě cementitu, potažmo zákalky. Doporučený obsah  $C = 3,5 - 3,8 \%$  a obsah  $Si = \max. 2,8 \%$ . Obsah výchozího křemíku závisí též na modifikátoru. Existují a hojně se používají modifikátory, které obsahují křemík. Jsou to předslitiny na bázi Fe-Si-Mg [3], [19].

Očkování má významný vliv na konečnou strukturu litiny. Očkováním vzniká vyšší množství grafitizačních zárodků (viz obr.2.13). To znamená zamezení vyloučení volného cementitu a tím zamezení tvorby zákalky. Předpokladem tohoto procesu je, aby litina měla dostatečný nukleační potenciál. Dalším důsledkem zvýšeného počtu nukleačních zárodků je, že se grafit



vyloučí v jemnější struktuře, což má pozitivní vliv na užité vlastnosti. Avšak příliš vysoká disperzita (jemnost) grafitu má nežádoucí účinky. Litina má sklon k endogennímu, kašovitému tuhnutí a vzniku mikroporozity. Doporučovaná disperzita se uvádí 150 kuliček grafitu na  $1 \text{ mm}^2$  [3], [5], [19].

Obr.: 2.13 Nukleační zárodky GJL a GJS [3]

Očkování je obzvláště nutné u tenkostěnných odlitků, kde má tendenci se tvořit zákalka, je-li potřeba aby byl grafit rovnoměrně vyloučen v celém průřezu odlitku nebo při požadavku na zvýšené mechanické vlastnosti litiny. U silnostěnných odlitků je riziko snížené dispersity (menší počet větších kuliček) z důvodu pomalého ochlazování [3], [5], [19].

Očkovadla jsou tvořena nosičem a krystalizačně aktivní složkou. Nosič je hlavní část hmoty očkovadla. Je v litině snadno rozpustný, s krystalizační složkou tvoří slitinu a zvyšuje aktivitu uhlíku. Tyto požadavky splňují slitiny Fe-Si (ferosilicium) a proto jsou nejčastějším druhem očkovadla. Aktivní složka je v očkovadle obsažena pouze v nízké koncentraci, avšak jak již název napovídá, jedná se o nepostradatelnou část a samotný nosič by na litinu neměl žádný efekt. Aktivními prvky jsou vápník, hliník, či zirkonium. Stroncium a baryum prodlužují očkovací účinek. Tyto prvky reagují s kyslíkem či sírou. Tyto sloučeniny mají teplotu tání vyšší, než je teplota taveniny, a proto slouží jako nukleační zárodky grafitu. Sloučeniny kyslíku s vápníkem, či hliníkem tvoří oxidy, které obalují jádro zárodka [3], [5], [19].

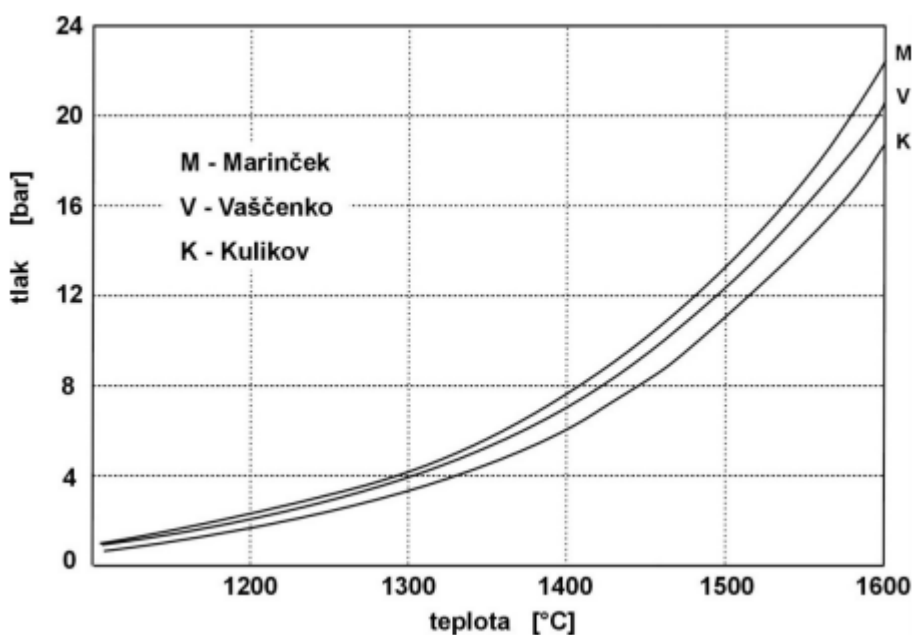
### 3 Odeznívání modifikačního účinku

Modifikační účinek není trvalý efekt a v čase dojde k jeho omezení, což má za následek snížení mechanických vlastností litiny. Dobu, po kterou zůstane materiál namodifikován, ovlivňuje úbytek hořčíku v tavenině. Úbytek Mg ovlivňuje spousta aspektů.

#### 3.1 Fyzikální podstata úbytku hořčíku

Hořčík má teplotu tání  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  a teplotu vypařování  $1110\text{ }^{\circ}\text{C}$  při atmosférickém tlaku. Teplota při tavení LKG se pohybuje okolo  $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Teplota procesu ovlivňuje tlak nasycených par Mg. Je-li tento tlak vyšší než tlak okolní atmosféry, dochází k intenzivnímu vypařování hořčíku z taveniny, čím méně bude tlak nasycených par převyšovat tlak atmosféry, tím bude reakce klidnější. Zvýší-li se tlak okolní atmosféry nad hodnotu tlaku Mg par, bude toto vypařování zastaveno [7], [3].

Touto problematikou se zabývali různí metalurgové, jenž přišli s výpočty, jak zjistit příslušný tlak, pro danou teplotu, kdy bude dosaženo rovnováhy teploty tavení Mg a teplotou taveniny, tudíž se hořčík bude v tavenině vyskytovat v tekutém stavu (viz Obr.: 3.1). Odchyłky jednotlivých autorů jsou zanedbatelné. Dle Obr.:3.1 se tlak Mg par pohybuje okolo 8 barů při teplotě  $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ , bere-li se v potaz teorie dle Kulikova. Při téže teplotě je tlak dle Marinčeka přibližně 11 barů [7], [3].



Obr.: 3.1 Tlak nasycených hořčíkových par v závislosti na teplotě dle různých autorů [7]

Tlak hořčíkových par dle Kulikova [7], [22], [3]:

$$\log P_{Mg} = -\frac{6333}{T} + 4,66 \quad (3.1)$$

kde:  $P_{Mg}$  – tlak nasycených par hořčíku [bar]  
 $T$  – teplota tavení [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Dalším důležitým faktorem pro modifikaci a její odeznívání je metalostatický tlak, který je dán výškou hladiny a hustotou taveniny [7], [22] [3]:

$$P_{met} = h \cdot \rho \cdot g \quad (3.2)$$

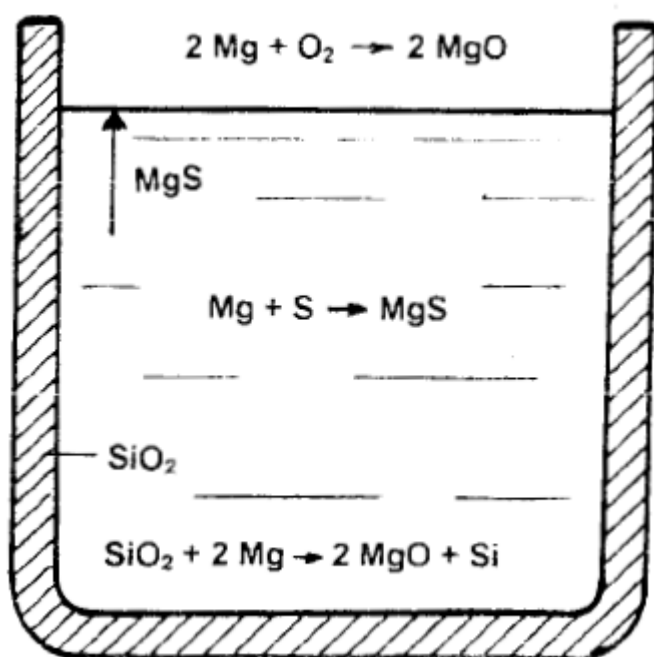
kde:  $P_{met}$  – metalostatický tlak [bar]  
 $h$  – výška kovového sloupce [m]  
 $\rho$  – hustota taveniny [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $g$  – tíhové zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]

Celková hodnota modifikační tlaku se vypočítá ze vztahu [7], [22]:

$$P_{Mg} = P_h + P_{met} \cdot \frac{1,013}{10^{-3}} \quad (3.3)$$

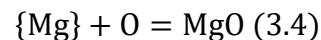
kde:  $P_h$  – tlak nad hladinou taveniny (záleží na způsobu modifikace)

### 3.2 Chemická podstata ztrát hořčíku



Obr.: 3.2 Chemické ztráty hořčíku [7]

Hořčík má silnou afinitu ke kyslíku a síře a tvoří s nimi termodynamicky stabilní oxidy a sulfidy (viz Obr.: 3.2). Oxidace Mg probíhá na kontaktu hladiny taveniny se vzdušným kyslíkem podle rovnice [7], [22], [3].



Čím větší plocha styku, tím jsou větší ztráty, proto se modifikační pánve vyrábí co nejušší. Důležité je též, aby hladina byla klidná. Dochází-li k míchání či přelévání, nastává intenzivnější odpařování. Literatura [3] uvádí, že ztráta hořčíku při přelítí kovu představuje 0,007 – 0,01 %. Tento efekt se dá pozitivně ovlivnit při modifikování v ochranné atmosféře [7], [22], [3].

Reoxidace sekundární strusky je mechanismus, při kterém se hořčík sloučí se sírou, čímž vytvoří sulfid hořečnatý (MgS), ten proplouvá taveninou vzhůru k hladině. Tento děj se odehrává podle rovnice [7], [22], [3]:



Na hladině hořčík z MgS reaguje s kyslíkem a tvoří oxid hořečnatý (MgO). Zbylá síra se vrací zpět do taveniny, kde reaguje s dalším hořčíkem, což urychluje odeznívání. Tento děj znázorňuje rovnice [7], [22] [3]:



S tímto jevem je nutnost počítat, jelikož na sebe síra váže více hořčíku, než odpovídá stechiometrické vazbě na Mg. Dle této vazby se na sebe váže 24,31 hm% Mg s 32,066 hm% S [7], [22] [3].

$$\frac{Mg}{S} = \frac{24,31}{32,066} \cong 0,76 \quad (3.7)$$

Tudíž ztráty Mg na S činí [7], [22], [3]:

$$Mg = 0,76 \cdot S \quad (3.8)$$

Dalším mechanismem úbytku hořčíku v tavenině je reakce se struskou a vyzdívkovými materiály, jenž obsahují SiO<sub>2</sub>. Hořčík v tavenině reaguje s oxidem křemičitým (SiO<sub>2</sub>), naváže se na kyslík a utvoří oxid hořečnatý, jenž putuje k hladině a tvoří strusku. Zbýlý křemík má nepatrný očkovací účinek. Tento proces probíhá podle rovnice [7], [22], [3]:



Tato reakce hraje roli převážně u nových pánví, jelikož u zaběhlých k tomuto jevu nedochází. Je to způsobeno tím, že na zaběhlých pánvích dochází k tvorbě zesintrované vrstvy, která postupně zpomaluje tuto reakci [7], [22], [3].

Výpočet potřebného množství modifikátoru [7], [22]:

$$m_{modif.} = \frac{0,76 \cdot \%S_v + Mg_{zbyt.}}{\% Mg_{modif.} \cdot \% \eta_{Mg}} \quad (3.10)$$

kde:  $m_{modif.}$  – množství modifikátoru [%]  
 $Mg_{zbyt}$  – zbytkový hořčík v tavenině [%]  
 $Mg_{modif.}$  – množství hořčíku v modifikátoru [%]  
 $\eta_{Mg}$  – využití hořčíku (10 až 60 %) [%]  
 $S_v$  – výchozí obsah síry [%]

Využití hořčíku se spočítá [7], [22]:

$$\eta_{Mg} = \frac{Mg_{zbyt.}}{Mg_{vs}} \quad (3.11)$$

kde:  $Mg_{vs}$  – vstupní hořčík [%]

## 4 Popis vlastního experimentu



Obr.: 4.1 Elektrická indukční pec

V roce 2021 byl proveden experiment, jenž měl za cíl ověřit vliv modifikace a odeznívání modifikačního účinku na reálný materiál. Pokus byl prováděn ve školní slévárně VUT FSI. Tavení kovu bylo zajištěno v elektrické indukční peci (viz Obr.:4.1). Odlito bylo 11 vzorků (blok Y2), na kterých se pozoroval úbytek modifikačního účinku. Vzorky byly zaformovány v samotuhnoucí formovací směsi křemenného ostřiva pojeného Geopolem. Očekávalo se, že se u dříve odlitých vzorků vyloučí grafit ve formě kuliček a postupně s časem jich bude ubývat a měnit se na červíkovitý a následně lupínkový grafit.

Chemické složení jednotlivých vzorků bylo měřeno pomocí spektrometru Q4 Tasman. Mikrostruktura byla pozorována na metalografických výbrusech pomocí mikroskopu Neophot 32. Vzorky byly odlévány po pěti minutách po dobu čtyřiceti minut a poslední dva vzorky se odlévaly po deseti minutách od momentu modifikace.

Modifikace se prováděla metodou SANDWICH, tato metoda byla zvolena kvůli jednoduchosti modifikačního procesu, nutnosti přelévát kov zpět do pece a pořizovací ceně. Modifikační pánev měla ploché dno (neměla kapsu pro modifikátor), na které byl nasypán modifikátor, který byl přikryt plechy. Teplota při odpichu byla 1550 °C. Provedena byla jedna tavba o hmotnosti 120 kg. Vstupní vsázka tavby se skládala z materiálů, jež jsou zaznamenány v Tab.2.

Tab. 2 Hmotnost vsázkových surovin.

Složení vsázky		
<b>Vratná LKG</b>	94	kg
<b>Surové železo</b>	20	kg
<b>Nauhličovadlo</b>	0,4	kg
<b>Modifikátor Elmag 6039</b>	1	kg
<b>Očkovadlo FerroPem</b>	11 x 55	g
<b>Plech</b>	4	kg
<b>Celková hmotnost tavby</b>	120	kg

Chemické složení modifikátoru Elmag 6039 je zapsáno v Tab.3.

Tab. 3 Chemické složení modifikátoru Elmag 6039.

Elmag 6039	
<b>Si</b>	46,8 %
<b>Al</b>	0,78 %
<b>Ca</b>	1,87 %
<b>Mg</b>	6 %
<b>KVZ</b>	0,1 %

Celá tavba trvala přibližně hodinu, časy a teploty při odpichu jsou znázorněny v Tab.4. Vzorek 0 byl odlit ihned po modifikaci, následně byl kov z modifikační pánve přelit zpět do pece, kde se udržoval na teplotě dle Tab. 4. Očkovadlo se aplikovalo do proudu kovu při přelévání do lící pánve. Po odlití se určilo chemické složení jednotlivých vzorků pomocí spektrometru. Dle výsledného obsahu hořčíku bylo rozhodnuto, že se metalografické výbrusy budou provádět na vzorcích 0,1,2,3,4, jelikož u nich docházelo k výraznějšímu poklesu hořčíku, který s časem odezníval pomaleji (viz Obr.: 4.2) a zároveň zde docházelo ke změnám grafitu mezi kuličkami, červíky a lupínky. Ostatní vzorky měly obsah Mg tak nízký, že se pravděpodobně jedná o LLG.

Tab. 4 Přehled odpichových teplot a časů odlití.

Číslo vzorku	Odpichová teplota [°C]	Čas od začátku modifikace [min]
vzorek 0	1450	1:34
vzorek 1	1412	6:36
vzorek 2	1420	10:31
vzorek 3	1420	15:19
vzorek 4	1400	20:06
vzorek 5	1410	25:04
vzorek 6	1405	30:21
vzorek 7	1375	35:07
vzorek 8	1380	39:56
vzorek 9	1400	50:06
vzorek 10	1380	60:34

Odlitky byly následně vyjmuty z forem, otryskány a řezány na zkušební vzorky pro metalografické výbrusy. Vzorky se po nařezání zalisovaly za tepla do plastické hmoty. Zalisované vzorky se brousily postupně na poloautomatické brusce, aby se minimalizovaly povrchové nerovnosti po řezném kotouči. Brusné kotouče měly zrnitost 120, 220, 800 a 1200. Po broušení následovalo leštění, kterým se docílilo zrcadlového lesku pozorovaných ploch. Leštěné vzorky se následně naleptaly 3% Nitalém. Vzorky se poté vyhodnocovaly pod mikroskopem při stonásobném zvětšení.

#### 4.1 Vyhodnocení chemického složení vzorků

Z výsledků chemického složení (viz Tab.5) lze zjistit využití hořčíku dle rovnice (3.10). Hořčíku bylo v modifikátoru 6 %. Na 1 kg modifikátoru tedy připadá 60 gramů Mg.

$$Mg_{vs} = \frac{Mg_{\text{modif}}}{m_{\text{tav}}} \cdot 100$$

$$Mg_{vs} = \frac{0,06}{120} \cdot 100$$

$$Mg_{vs} = 0,05 \%$$

kde:  $Mg_{vs}$  – obsah vstupního hořčíku [kg]  
 $m_{\text{tav}}$  – hmotnost tavby [kg]  
 $Mg_{\text{modif}}$  – obsah hořčíku v modifikátoru [%]

Jelikož reálný zbytkový hořčík ve vzorku 0 je 0,03 % využití Mg se vypočítá podle rovnice:

$$\eta_{Mg} = \frac{Mg_{\text{zbyt.}}}{Mg_{vs}} \cdot 100$$

$$\eta_{Mg} = \frac{0,03}{0,05} \cdot 100$$

$$\eta_{Mg} = 60 \%$$

kde:  $\eta_{Mg}$  – využití hořčíku

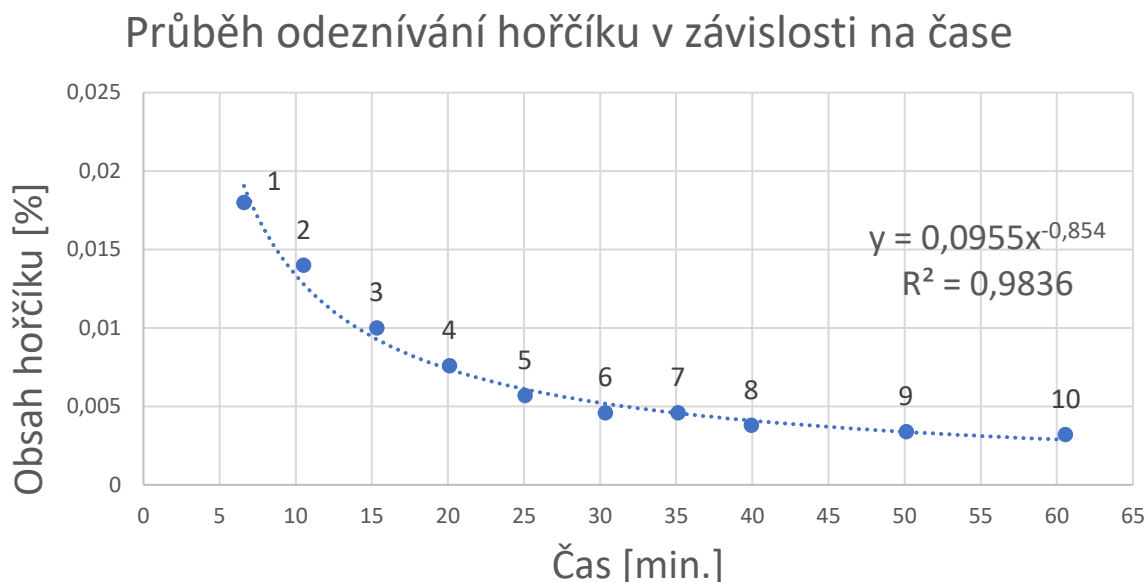
Tab. 5 Přehled chemického složení jednotlivých vzorků.

	C	Si	Mn	P	S	Mg	Sc
0	3,654	2,594	0,249	0,025	0,038	0,030	1,062
1	3,646	2,579	0,255	0,025	0,014	0,018	1,056
2	3,656	2,602	0,254	0,026	0,013	0,014	1,061
3	3,512	2,667	0,253	0,025	0,013	0,010	1,025
4	3,571	2,661	0,255	0,025	0,013	0,0076	1,042
5	3,535	2,628	0,251	0,025	0,015	0,0057	1,028
6	3,518	2,597	0,251	0,025	0,017	0,0046	1,021
7	3,464	2,724	0,252	0,025	0,021	0,0046	1,017
8	3,424	2,657	0,252	0,027	0,026	0,0038	1,000
9	3,281	2,622	0,243	0,026	0,040	0,0034	0,957
10	3,257	2,570	0,227	0,026	0,064	0,0032	0,948

Obvyklé využití hořčíku z modifikátoru se uvádí v rozmezí 10 – 60 %, to znamená, že modifikace byla provedena efektivně. Mezi vzorky 0 a 1 jde vidět prudký pokles Mg. Tato prudká ztráta byla zapříčiněna přelitím kovu z modifikační pánve zpět do pece. Tato ztráta činila 0,012 % Mg, což potvrzuje tezi z literatury [22], která tvrdí, že ztráty hořčíku při přelití mohou činit 0,007 – 0,01 %. Samozřejmě přelévání nebyl jediný činitel takovéto ztráty a výrazný vliv měl i pokles síry, jenž činil 0,024 % a další jevy vysvětlené v předchozí kapitole.



Na tomto obrázku je graficky reprezentován úbytek hořčíku v tavenině vlivem času. Vzorek 0 není prezentován v Obr.:4.2, jelikož na něj působí jiné vnější činitele než na ostatní vzorky (skoková změna obsahu Mg vlivem přelítí). Graf je proložen mocninou funkcí, která přesně predikuje průběh odeznívání modifikačního účinku. Z grafu je názorné, že při obsahu zbytkového hořčíku okolo 0,005 % dochází již k minimálním ztrátám.



Obr.: 4.2 Graf znázorňující průběh odeznívání Mg v závislosti na čase

## 4.2 Vyhodnocení metalografických výbrusů vzorků

Vzorek 0 byl odlit v čase 1 min 34 s od namodifikování taveniny a obsahoval 0,03 % Mg, tento obsah Mg je uváděn jako minimální vhodné množství pro vyloučení grafitu ve formě kuliček. Na výbrusu (viz Obr.: 4.3) se ukázalo, že vyloučená struktura grafitu je převážně dokonale kuličková, avšak jsou zde útvary, které mají tvar nedokonale kuličkového grafitu.

Vzorek 1 byl odlit v čase 6 min 36 s a obsahoval 0,018 % Mg, tento obsah je již pod minimem vhodného množství hořčíku, které se doporučuje. Na výbrusu (viz Obr.:4.4) lze vidět, že vyloučený grafit má stále tvar kuliček, pouze přibývá nedokonale kuličkových útvarů.

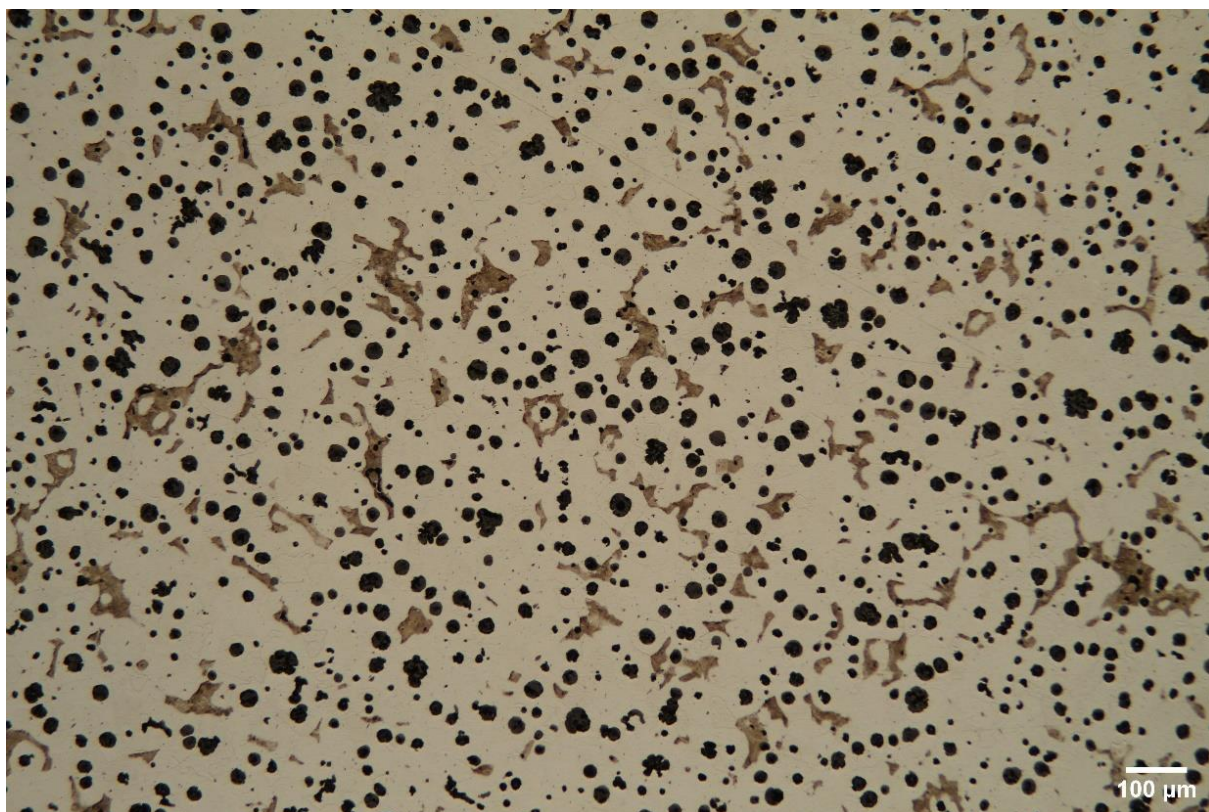
Vzorek 2 byl odlit v čase 10 min 31 s a obsahoval 0,014 % Mg. Z výbrusu (viz Obr.: 4.5) je patrné, že kuličky tvoří přibližně 75 % grafitické struktury, zbytek tvoří červíkovité útvary.

Vzorek 3 byl odlit v čase 15 min 19 s a obsahoval 0,010 % Mg. Na výbrusu (viz Obr.: 4.6) lze vidět, že přibližně polovinu vyloučeného grafitu tvoří kuličkové útvary, zbytek grafitu se vyloučil ve formě červíků.

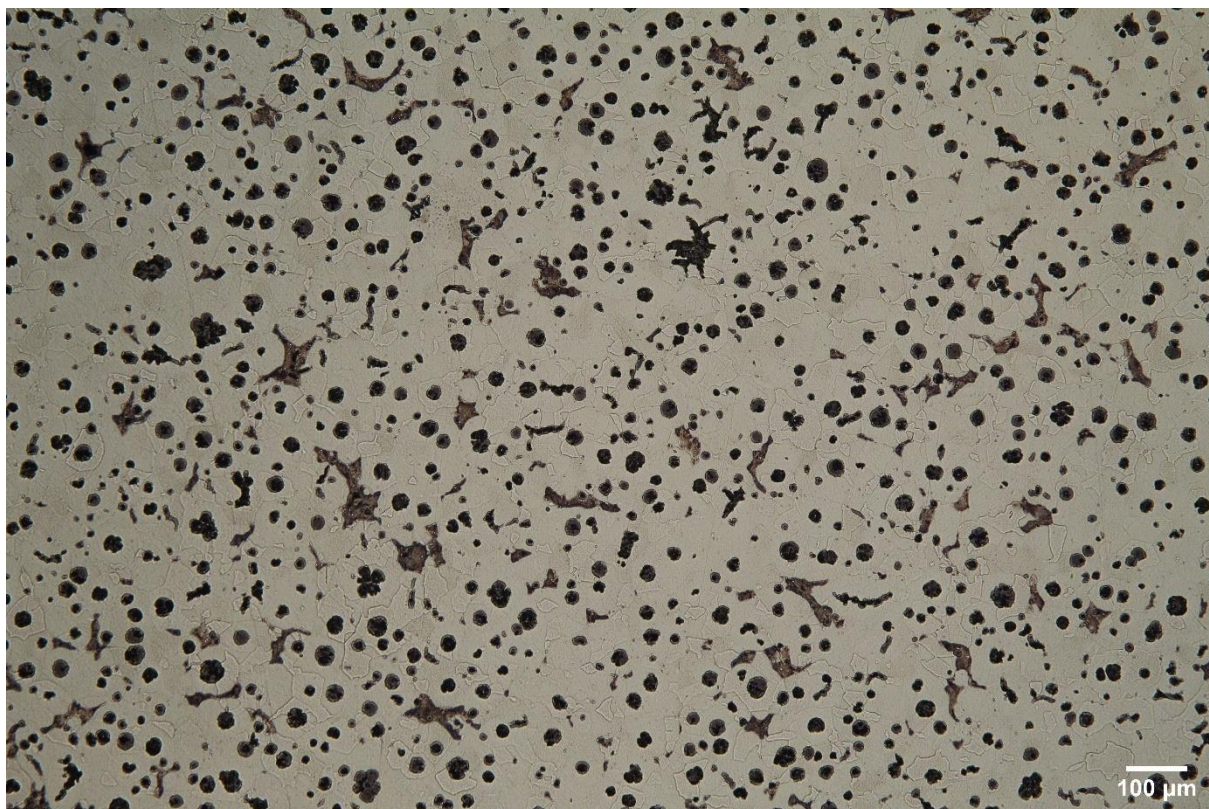
Vzorek 4 byl odlit v čase 20 min a 6 s a obsahoval 0,0076 % Mg. Na výbrusu (viz Obr.:4.7) je patrné, že kuličkového grafitu je zde minimum a většina vyloučeného grafitu je ve formě červíkovitých útvarů, které tvoří přibližně 80 % vyloučeného grafitu.

Metalografické výbrusy názorně ukazují, jak se v průběhu času mění dokonale kuličkové útvary grafitu na nedokonale kuličkové a následně červíkovité.

Všechny pozorované vzorky mají feriticko-perlitickou strukturu, kde je dominantní ferit, který tvoří přibližně 90 % struktury. S klesajícím podílem kuličkového grafitu klesá podíl perlitu. To je dáno zkracováním difuzních vzdáleností pro uhlík s rostoucím podílem jemného lamelárního grafitu.

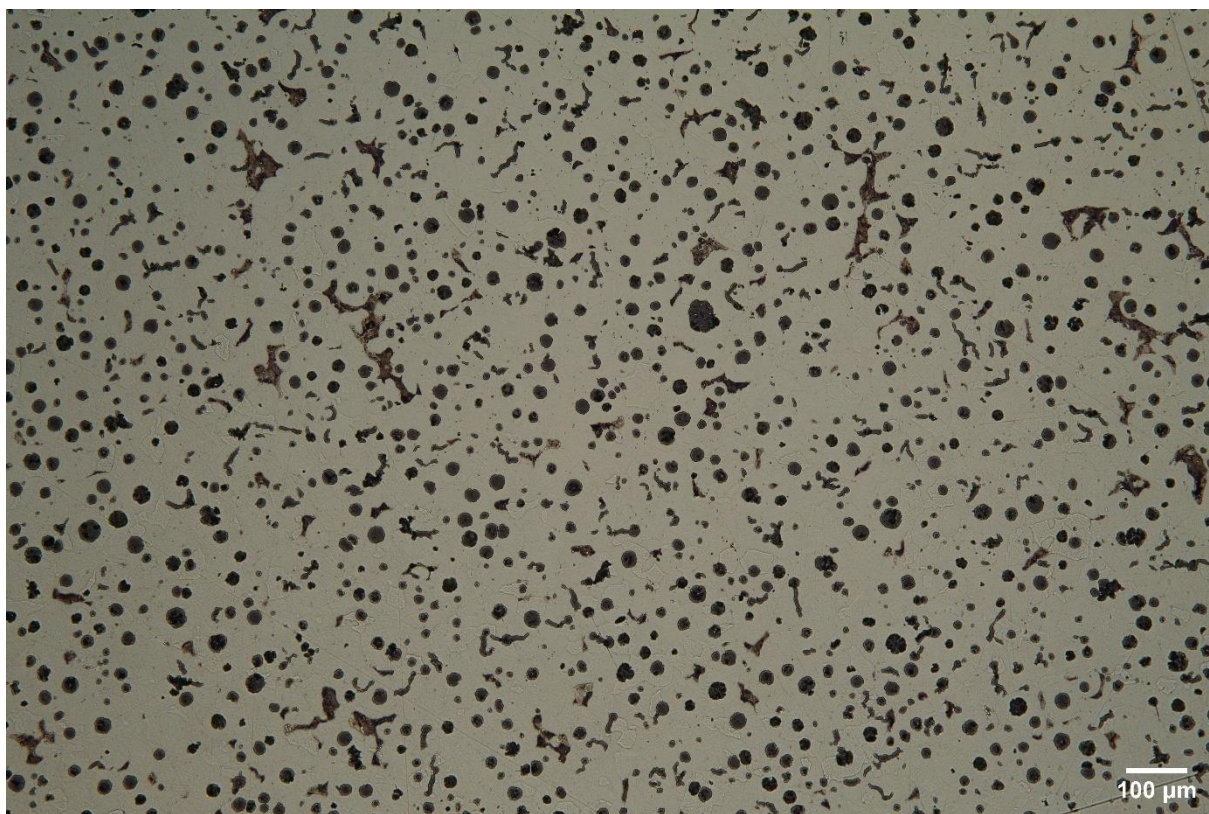


Obr.: 4.3 Metalografický výbrus vzorku 0 (0,030 % Mg) při stonásobném zvětšení

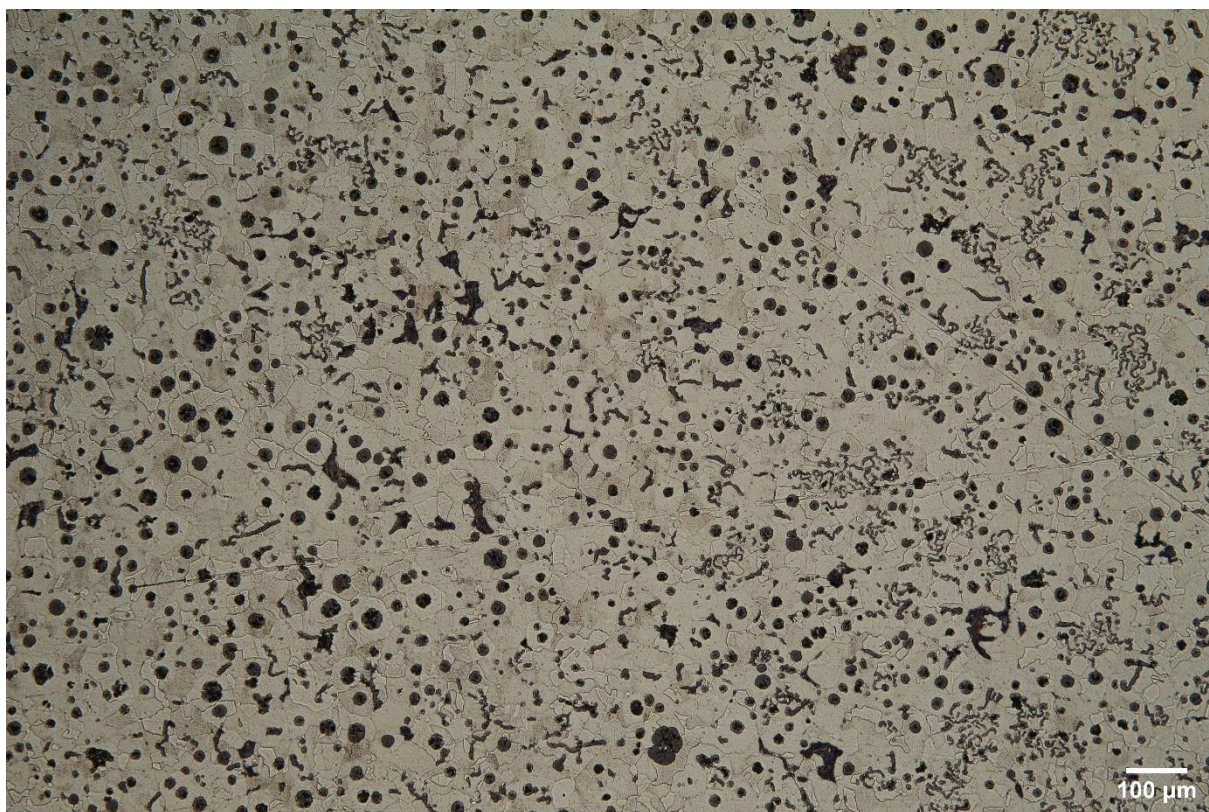


Obr.: 4.4 Metalografický výbrus vzorku 1 (0,018 % Mg) při stonásobném zvětšení



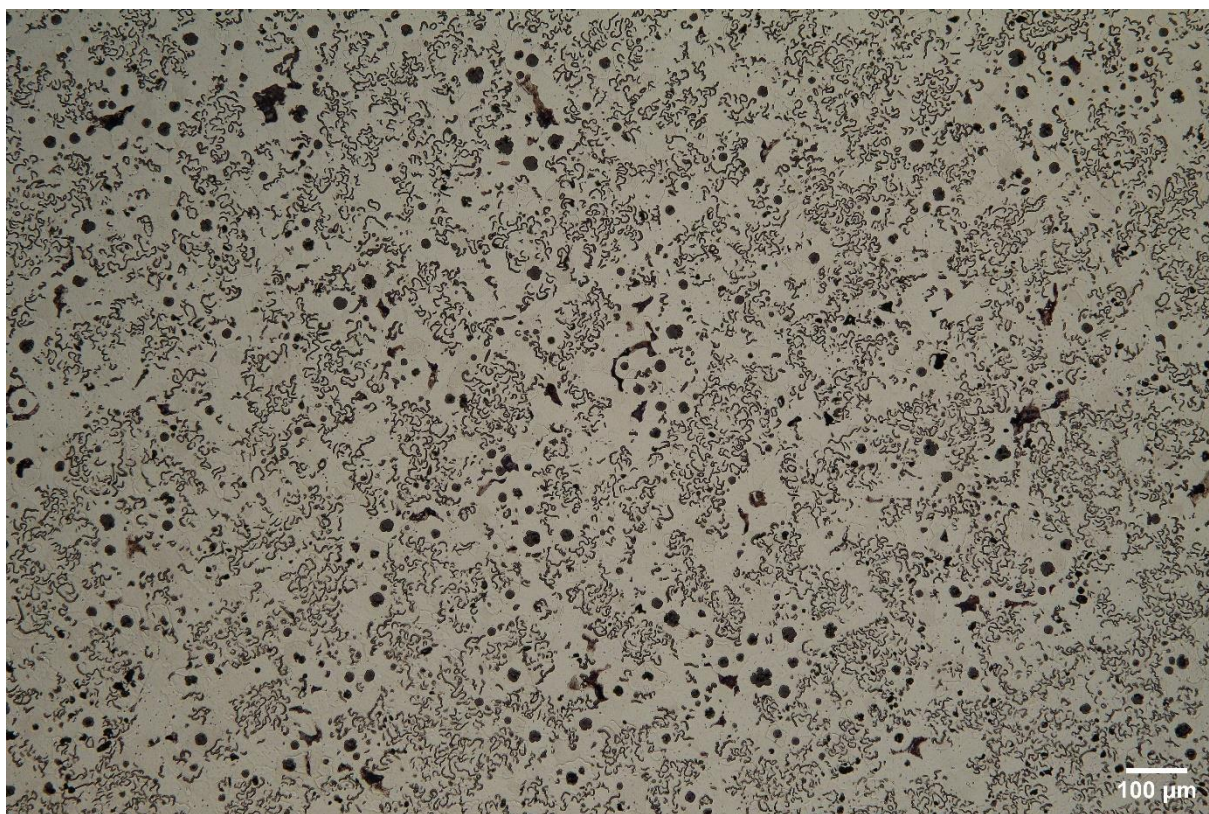


Obr.: 4.5 Metalografický výbrus vzorku 2 (0,014% Mg) při stonásobném zvětšení



Obr.: 4.6 Metalografický výbrus vzorku 3 (0,010 % Mg) při stonásobném zvětšení





Obr.: 4.7 Metalografický výbrus vzorku 1 (0,0076 % Mg) při stonásobném zvětšení

## 5 Závěry

Efektivní výroba litiny s kuličkovým grafitem kriticky závisí na zvládnutí mimopecního zpracování daného materiálu. Před výrobou LKG je nutno zvážit možnosti dané slévárny pro volbu tavícího agregátu a volbu vhodné modifikační metody a tím predikovat následky dané volby.

Pro účinnou modifikaci je nutno zvážit vhodný tavící agregát. Moderní slévárny upřednostňují elektrické indukční pece před kuplovkami, z důvodu nižšího nasíření taveniny, nižších emisí a ekonomiky provozu.

Zásadní vliv na efektivitu modifikace má volba metody mimopecního zpracování litiny. Pro závody s nízkou produkcí LKG je vhodné použít polévací metody, tedy SANDWICH a TUNDISH z důvodu nízkých vstupních nákladů a jednoduchosti provozu s nevýhodou vyšší spotřeby modifikátoru a rychlejšího odeznívání modifikačního účinku. Modifikace v konvertoru se používá pro vysokou produkci.

Závody s vyšší produkcí LKG nejvíce zužitkují metody ponořovací. Nejčastěji používanou metodou je modifikace plněným profilem. Metoda ponorným zvonek a modifikace ve sferoklávu se téměř nepoužívají.

Je-li slévárna schopna produkovat litinu s nízkým obsahem síry, může volit průtočné metody modifikace. Modifikace probíhá ve vtokové soustavě odlitku. Je zde náročnější příprava forem, avšak nižší cena procesu.

Při modifikaci je nutno brát v potaz, že ztráty hořčíku mohou být jak fyzikální, tak chemické. Z fyzikálního hlediska procesu má pozitivní vliv, když na modifikovanou taveninu působí zvýšený tlak okolní atmosféry, čímž se omezuje vypařování hořčíku. Z chemického hlediska je vhodné, aby tavenina nepřicházela do kontaktu se vzdušným kyslíkem, nedocházelo k míchání kovu, tavenina obsahovala co nejméně síry a kyslíku a modifikace probíhala v pánvi se zesintrovanou vrstvou.

Vlastní experiment byl taven v elektrické indukční peci, modifikace probíhala metodou SANDWICH a bylo odlito 11 vzorků. Použitý modifikátor byl Elmag 6039. Po modifikaci byla v tavenině 0,03 % zbytkového hořčíku. Využití hořčíku z modifikátoru bylo 60 %. Skokový úbytek hořčíku mezi vzorky 0 a 1, jenž činil 0,012 % Mg, byl způsoben přelitím materiálu z modifikační pánve zpět do pece. Experiment ukázal, že za uvedených podmínek dojde k přeměně většiny kuličkového grafitu na vermikulární za přibližně 20 minut, při obsahu kolem 0,0075 % Mg. Ke vzniku prvních červíkovitých útvarů grafitu došlo někdy mezi 5. a 10. minutou při obsahu Mg v rozmezí 0,018 až 0,014 %. Za podmínek daného experimentu, je možno predikovat obsah Mg pomocí rovnice  $Mg = 0,095 \cdot t^{-0,854}$ .

Tato práce ukazuje, že modifikace grafitických litin je komplexní problematika, které je nutno porozumět, aby nedocházelo k výrobě zmetků při odlévání litiny s kuličkovým grafitem.

## Seznam použitých zdrojů

1. HLA VINKA, Josef. Výroba odlitků v České republice. *Slévárenství* [online]. 2018, 66(9-10), 412-413 [cit. 2021-02-24]. ISSN 0037-6825. Dostupné z: <https://www.pablikado.cz/dokument/UWAcca6eMt7jMOPb>
2. ŘASA, Jaroslav a Josef ŠVERCL. *Strojnické tabulky: pro školu a praxi* [online]. Praha: Scientia, 2007 [cit. 2021-03-20]. ISBN 978-80-86960-20-3.
3. ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
4. JELÍNEK, Petr. *Slévárenství*. 5. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1282-3.
5. ŠENBERGER, Jaroslav. *Metalurgie oceli na odlitky*. V Brně: VUT IUM, c2008. ISBN 978-80-214-3632-9.
6. PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
7. HAMPL, Jiří, Vladimír VONDRÁK a Aleš HANUS. *Metalurgie litin-mimopeční zpracování roztavené litiny: Studijní opora*. Ostrava, 2008.
8. ČSN EN ISO 945-1: Mikrostruktura litin - Část 1: Klasifikace grafitu vizuální analýzou. Praha: ČAS, 2020.
9. ALAGARSAMY, Al. *Ductile iron handbook: Des Plaines*. III. American Foundrymen's Society, 1992. ISBN 08-743-3124-2.
10. BROWN, John R. *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook*. 11th Edition. Elsevier, 2013. ISBN 978-0-08-050679-1.
11. MAHAJAN, Deepti. Skin effect. <https://www.britannica.com: Encyclopedia Britannica> [online]. 26.11.2008 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/skin-effect>
12. Induction heating. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Induction\\_heating](https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_heating)
13. Joule heating. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Joule\\_heating](https://en.wikipedia.org/wiki/Joule_heating)
14. HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: EUROPRINT, 2011. ISBN 978-80-01-04938-9.
15. CHRÁST, Jaroslav. *Slévárenská zařízení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-7204-456-7.
16. ČSN EN 1562 (42 0955): *Slévárenství - Temperované litiny*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
17. ČSN EN 1561 (42 0953): *Slévárenství - Litiny s lupínkovým grafitem*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
18. ČSN EN 1563 (42 0951): *Slévárenství - Litina s kuličkovým grafitem*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

19. CAMPBELL, John. *Complete Casting Handbook - Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design* [online]. I. Elsevier, 2011 [cit. 2021-5-20]. ISBN 978-0-08096-423-2. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCCHMCPM1/complete-casting-handbook/complete-casting-handbook>
20. DAVIS, J.R. *Metals Handbook, Desk Edition*. 2nd. ASM International, 2015. ISBN 978-1-68015-950-9. Dostupné z <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMHDEE004/metals-handbook-desk/metals-handbook-desk>
21. Diffusion. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Diffusion>
22. GEDEONOVÁ, Zora a Imrich JELČ. *Metalurgia liatin*. Košice: Hutnícka fakulta Technickej univerzity, 2000. ISBN 8070995165.
23. GRUZLESKI, John E. *Microstructure Development during Metalcasting* [online]. I. American Foundry Society, 2018 [cit. 2021-5-20]. ISBN 978-1-5231-2099-4. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMDM00013/microstructure-development/microstructure-development>
23. *Citace PRO* [online]. Brno: Ústřední knihovna VUT, c2012-2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
„A“	Směr růstu grafitu v prizmové rovině	[-]
„C“	Směr růstu grafitu v bazální rovině	[-]
C <sub>C</sub>	Koncentrace uhlíku v eutektiku	[%]
C <sub>E</sub>	Uhlíkový ekvivalent	[-]
d	Vzdálenost, kdy výčnělky grafitu tuhnou	[μm]
GJL	Litina s lupínkovým grafitem	[-]
GJM	Temperovaná litina	[-]
GJS	Litina s kuličkovým grafitem	[-]
g	Tíhové zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
h	Výška sloupce kovu	[m]
I	Proud	[A]
LKG	Litina s kuličkovým grafitem	[-]
LLG	Litina s lupínkovým grafitem	[-]
LVG	Litina s vermikulárním grafitem	[-]
Mg <sub>modif</sub>	Obsah hořčíku v modifikátoru	[%]
Mg <sub>vs</sub>	Obsah vstupního hořčíku	[%]
Mg <sub>zbyt</sub>	Zbytkový hořčík	[%]
m <sub>i</sub>	Koeficient vlivu prvku x	[-]
m <sub>modif</sub>	Množství modifikátoru	[%]
m <sub>tav</sub>	Hmotnost tavby	[kg]
P <sub>h</sub>	Tlak nad hladinou taveniny	[bar]
P <sub>met</sub>	Metalostatický tlak	[bar]
P <sub>Mg</sub>	Tlak nasycených par hořčíku	[bar]
Q	Jouleovo teplo	[J]
R	Odpor	[Ω]
S <sub>C</sub>	Stupeň eutektičnosti	[-]
S <sub>V</sub>	Výchozí obsah síry	[%]
T	Teplota tání	[°C]
x <sub>i</sub>	Obsah prvku x	[%]
η <sub>Mg</sub>	Využití hořčíku	[%]
ρ	Hustota	[kg/m <sup>3</sup> ]
σ	Povrchové napětí	[N/m]



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.: 1.1 Diagram (železo - uhlík) Fe – C - čárkovaný, (železo - karbid železa) Fe - Fe <sub>3</sub> C – plnou čarou [2].....	10
Obr.: 1.2 Tvar grafitu [8] .....	12
Obr.: 1.3 Rozložení grafitu [8].....	12
Obr.: 1.4 Růst grafitu v hexagonální soustavě [9] .....	13
Obr.: 1.5 Růst kuliček grafitu šroubovicovými dislokacemi [9] .....	13
Obr.: 1.6 Růst grafitu modelem rozpadu rozhraní [9] .....	13
Obr.: 1.7 Obvodový růst grafitu [9] .....	13
Obr.: 2.1 Pseudobinární diagram Fe-C-Si [6] .....	16
Obr.: 2.2 Schéma kuplovny [3].....	18
Obr.: 2.3 Cívka [3] .....	19
Obr.: 2.4 Kanálková indukční pec [14].....	20
Obr.: 2.5 Kelímková indukční pec [15] .....	20
Obr.: 2.6 Pánev na modifikaci metodou SANDWICH [3] .....	22
Obr.: 2.7 Pánev na modifikaci metodou TUNDISH [3] .....	22
Obr.: 2.8 Schéma procesu tavení v konvertoru [7] .....	23
Obr.: 2.9 Zařízení pro modifikaci ponorným zvonem [7] .....	23
Obr.: 2.10 Schéma sferoklávu [3] .....	24
Obr.: 2.11 Vtoková soustava pro metodu Inmold [3] .....	24
Obr.: 2.12 Schéma modifikace plněným profilem [6] .....	25
Obr.: 2.13 Nukleační zárodky GJL a GJS [3] .....	26
Obr.: 3.1 Tlak nasycených hořčíkových par v závislosti na teplotě dle různých autorů [7].....	27
Obr.: 3.2 Chemické ztráty hořčíku [7] .....	28
Obr.: 4.1 Elektrická indukční pec .....	30
Obr.: 4.2 Graf znázorňující průběh odeznívání Mg v závislosti na čase .....	33
Obr.: 4.3 Metalografický výbrus vzorku 0 (0,030 % Mg) při stonásobném zvětšení .....	34
Obr.: 4.4 Metalografický výbrus vzorku 1 (0,018 % Mg) při stonásobném zvětšení .....	34
Obr.: 4.5 Metalografický výbrus vzorku 2 (0,014% Mg) při stonásobném zvětšení .....	35
Obr.: 4.6 Metalografický výbrus vzorku 3 (0,010 % Mg) při stonásobném zvětšení .....	35
Obr.: 4.7 Metalografický výbrus vzorku 1 (0,0076 % Mg) při stonásobném zvětšení .....	36

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Doporučené chemické složení pro litiny s kuličkovým grafitem [5].....	14
Tab. 2 Hmotnost vsázkových surovin. ....	30
Tab. 3 Chemické složení modifikátoru Elmag 6039.....	31
Tab. 4 Přehled odpichových teplot a časů odlití. ....	31
Tab. 5 Přehled chemického složení jednotlivých vzorků.....	32